

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Diagnostika jakosti nízkoztrátových plechů pro stavbu
magnetických jader transformátorů**

**Quality Diagnostic of the Low-losses Sheets for the
Construction of Magnetic Cores of the Transformers**

Prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne: 4. 5. 2012



Ondřej Vávra

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za poskytnutí odborné pomoci při vypracování a korekci diplomové práce.

Abstrakt:

Tato práce se zabývá magnetickými vlastnostmi nízkoztrátových elektrotechnických plechů pro jádra transformátorů. Práce je rozdělena do šesti základních částí. V první části práce jsou uvedeny základní magnetické veličiny, následují magnetické vlastnosti látek a materiálů. Třetí část popisuje technologii výroby, základní rozdělení výroby plechů a pásů, specifikuje kritické vlastnosti těchto plechů. Čtvrtá část práce se zabývá měřením a měřicími přístroji. V páté části je popsána experimentální analýza tloušťky plechu. V poslední části je vyhodnoceno měření.

Klíčová slova:

transformátor, magnetické materiály, magnetické vlastnosti, diamagnetismus, paramagnetismus, feromagnetismus, magneticky měkký materiál, magneticky tvrdý materiál, magnetické pole, magnetické látky, charakteristika, magnetování, metody měření, indukce, intenzita, remanence, koercitivita, permeabilita, orientovaný plech, neorientovaný plech

Abstract:

This work deals with low-loss magnetic properties of electrical sheets for transformers cores. The work is divided into six parts. The first part presents basic magnetic quantities, followed by the magnetic properties of substances and materials. The third section describes the production technology, basic production allocation base sheet and strip, and specifies critical properties of these sheets. The fourth part deals with measurement and measuring instruments. The fifth section describes the experimental analysis of sheet thickness. The last part is evaluated measurements.

Key words:

transformer, magnetic materials, magnetic properties, diamagnetism, paramagnetism, ferromagnetism and magnetically soft materials, hard magnetic materials, magnetic field, magnetic substances, characteristics, magnetization, measurement methods, induction, intensity, remanence, coercivity, permeability, oriented sheet, non-oriented sheet

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>Symbol</i>	<i>Název</i>	<i>Jednotka</i>
Φ	magnetický tok	[Wb]
B	magnetická indukce	[T]
B_{max}	mezní hodnota magnetické indukce	[T]
B_r	remanence	[T]
F_m	magnetomotorické napětí	[A]
H	magnetická intenzita	[A/m]
H_c	koercitivita	[A/m]
H_{max}	mezní hodnota magnetické intenzity	[H/m]
I	magnetovací proud	[A]
J	magnetická polarizace	[T]
S	plocha	[m ²]
f	frekvence	[Hz]
p	magnetizační ztráty	[W/kg]
μ	permeabilita prostředí	[H/m]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
μ_{amp}	amplitudová relativní permeabilita	[-]
μ_{max}	maximální relativní permeabilita	[-]
t	čas	[s]

<i>Zkratka</i>	<i>Význam</i>
Al	hliník
As	arsenid
Ba	baryum
Bi	bismut
C	uhlík
Cu	měď
EAS	elektrotechnické anizotropní oceli
Ei	elektrotechnické plechy válcované za studena
Eo	elektrotechnické plechy válcované za studena
Et	elektrotechnické plechy válcované za tepla
Fe	železo
Gd	gadolinium
Mn	mangan
N	nitrid
Ni	nikl

Obsah

1	ÚVOD	1
2	Teoretická část	2
3	Magnetické vlastnosti látek a materiálů	5
3.1	Feromagnetické látky a materiály	6
3.1.1	Magneticky měkká feromagnetika	8
3.1.2	Magneticky tvrdá feromagnetika	9
3.1.3	Porovnání magneticky měkkého a tvrdého feromagnetika	10
4	Normy ČSN EN pro elektrotechniku	11
4.1	Termíny a definice normy ČSN EN 10107	12
4.1.1	Šavovitost (edgecamber)	12
4.1.2	Rovinnost (flatnes)	12
4.1.3	Počet ohybů (numberofbends)	12
4.1.4	Vnitřní pnutí (internalstresses)	12
4.2	Třídění a označování normy ČSN EN 10107	12
4.2.1	Třídění	12
4.2.2	Označování	12
4.3	Všeobecné požadavky ČSN EN 10107	13
4.3.1	Způsob výroby	13
4.3.2	Způsob dodávání	13
4.3.3	Podmínky dodávky	13
4.3.4	Stav povrchu	13
4.3.5	Vhodnost ke stříhání	13
4.4	Technické požadavky ČSN EN 10107	14
4.4.1	Magnetické vlastnosti	14
4.4.1.1	Magnetická polarizace	14
4.4.1.2	Měrné ztráty	14
4.5	Rozměry a mezní úchyly rozměru a tolerance tvaru ČSN EN 10107	14
4.5.1	Tloušťka	14
4.5.2	Šířka	14
4.5.3	Délka	15
4.5.4	Šavovitost	15
4.5.5	Rovinnost (vlnitost)	15

4.5.6	Zbytkové prohnutí.....	15
4.5.7	Výška otřepů	15
4.6	Technologické vlastnosti ČSN EN 10107.....	16
4.6.1	Hustota	16
4.6.2	Činitel zaplnění	16
4.6.3	Počet ohybů.....	16
4.6.4	Vnitřní pnutí.....	16
4.6.5	Odpor izolační vrstvy.....	16
5	Plechý a pásy pro magnetické obvody a jádra	17
5.1	Plechý z křemíkové oceli	17
5.2	Rozdělení plechů a pásů pro elektrotechniku.....	19
5.2.1	Neorientované plechy a pásy	19
5.2.1.1	Elektrotechnické plechy Et.....	19
5.2.1.2	Elektrotechnické plechy Ei.....	20
5.2.2	Orientované plechy a pásy	21
5.2.2.1	Pásy s Gossovou texturou	22
5.2.2.2	Pásy s kubickou texturou.....	23
5.2.2.3	Elektrotechnické plechy Eo.....	24
5.3	Vlastnosti plechů a pásů pro elektrotechniku.....	26
5.4	Technologie výroby plechů a pásů pro elektrotechniku.....	27
5.4.1	Sulfidická varianta (varianta "Armco", USA).....	27
5.4.2	Sulfidicko-seleniová varianta (varianta "Kawasaki", Japonsko).....	28
5.4.3	Sulfidicko-nitridická varianta (varianta "Nippon Steel", Japonsko),	28
5.4.4	Nitridicko-měďná varianta (varianta vyvinuta v Rusku v Novo-Lipetsku)	29
5.5	Specifikace kritických vlastností a parametrů nízkoztrátových plechů	30
5.5.1	Požadované vlastnosti nízkoztrátových pásů	30
5.5.2	Možnosti ovlivnění kvality nízkoztrátových plechů a pásů	31
6	Standardní měření nízkoztrátového pásu	32
6.1	Měření magnetických vlastností	32
6.2	Měření geometrických tvarů	34
6.3	Měření povrchového izolačního odporu	35
7	Metody a metodika kontroly kritických parametrů.....	36
7.1	Metody měření magnetických vlastností.....	36

7.1.1	Měřicí přístroj magnetických vlastností MPG	36
7.1.1.1	Epsteinův rámec	38
7.2	Metody měření geometrických tvarů	40
7.2.1	Měření šířky digitálním posuvným měřítkem	40
7.2.2	Měřič tloušťky X-ray	42
7.2.3	Měření tloušťky digitálním mikrometrem.....	42
7.2.4	Měření tloušťky pomocí měřiče MPP	42
7.2.5	Měřicí rovní (kovový) stůl na měření rovinnosti, klínovitosti apod.....	44
7.3	Měření povrchového izolačního odporu pomocí Franklin testeru	44
7.4	Měření povrchových vad.....	45
7.5	Technologické vlastnosti.....	46
8	Experimentální analýza tloušťky plechu.....	47
8.1	Sada plechů 1	48
8.2	Sada plechů 2	53
8.3	Sada plechů 3	58
8.4	Celková průměrná střední hodnota tloušťky sady 1; 2; 3	63
9	Zhodnocení a závěr	64
10	Použité zdroje.....	65

1 ÚVOD

Kolem roku 1886 se uskutečňují první pokusy s přenosem střídavého proudu. K jeho přenosu bylo nutno zkonstruovat transformátor. V té době bylo možné jádro transformátoru vyrobit jen z čistého železa. Železo rychle stárlo, mělo velké ztráty způsobené vířivými proudy. Objevem Hadfielda (asi 1890), že přídavek křemíku zlepšuje vlastnosti konstrukčních ocelí, se začal zabývat Gumlich, který poznal význam tohoto objevu. Křemík působí jako dezoxidační přísada a váže na sebe škodlivé nečistoty, tím se zmenšují hysterezní ztráty. Přídavek křemíku také zvětšuje elektrický měrný odpor a zmenšuje ztráty vířivými proudy, zpomaluje stárnutí. První velké zlepšení nastává okolo roku 1900 po zavedení legování oceli křemíkem. Druhý zlom pro zlepšení jakosti znamená zavedení výroby texturovaných plechů válcovaných za studena po roce 1935. Pásky s orientovanou strukturou byly vyráběny nejprve v Německu v šířce asi 100 mm. Průmyslová výroba se rozjíždí kolem roku 1944 v USA. Texturované pásky se zde začínají vyrábět ve velkém měřítku. Roční výroba v roce 1955 dosahovala už 500 000 tun pásů. Ostatní země byly dlouho závislé na dovozu materiálu z USA. Spotřeba texturovaných pásů stále stoupala, a tak se i přes vysoké investice, začaly válcovny stavět i v jiných zemích. V dnešní době vyrábí tyto pásky asi 13 firem. Největší z nich jsou Armco Steel, Kawasaki Steel, Nippon Steel, British Steel, Thyssen, Cničermet a Novolipečský metalurgický kombinát, Verchisecký závod v Jekatěrinburgu. V České republice se tyto pásky vyrábí ve válcovnách plechů ArcelorMittal Frýdek-Místek. [6]

V první části práce jsou uvedeny základní magnetické veličiny, následují magnetické vlastnosti látek a materiálů. Třetí část popisuje technologii výroby, základní rozdělení výroby plechů a pásů a specifikuje kritické vlastnosti těchto plechů. Důležitou částí práce je část zabývající se měřením a měřicími přístroji.

Cílem této práce je posoudit nehomogenitu tloušťky a jakosti typových nízkoztrátových elektrotechnických plechů.

2 Teoretická část

Známe dvě soustavy jednotek v oboru magnetismu – CGS a SI. CGS soustava vychází pouze ze tří jednotek. U nás není již od roku 1974 povoleno tuto soustavu používat, ale i tak se některé jednotky v dokumentaci stále ještě ojediněle objevují. Jednotky u nás zavedené zákonem v oboru magnetismu nahrazují tuto soustavu. Nová soustava, označovaná SI má sedm základních jednotek.

Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole

1) Magnetický tok (Φ) – vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících danou plochou, kolmou na směr orientace siločar.

Fyzikální jednotka magnetického toku:

- a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

1 Weber [Wb],

1 voltsekunda [Vs], \rightarrow odvozená ze vztahu: $\Phi = U_i \cdot t$ [Vs; V, s], (1)

- b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS (předchůdce soustavy SI):

1 Maxwell [M],

- c) vzájemný přepočet fyzikálních jednotek:

1 Wb = 1 Vs = 10⁸ M,

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\Phi = B \cdot S \text{ [Wb; T, m}^2\text{]}. \quad (2)$$

2) Intenzita magnetického pole (H) – vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu tekoucího vodičem cívky) a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Fyzikální jednotka intenzity magnetického pole:

- a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

1 ampér na metr [A/m],

- b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS (předchůdce soustavy SI):

1 Oersted [Oe],

- c) vzájemný přepočet fyzikálních jednotek:

$$1 \text{ A/m} = 4\pi / 1000 = 0,0125664 \text{ Oe}, \quad (3)$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$H = F_m / l \text{ [A/m; A, m]}, \quad (4)$$

kde F_m je magnetomotorické napětí,

l střední délka siločáry magnetického pole .

$$H = B / \mu \text{ [A/m; T, H/m]}, \quad (5)$$

$$H = B / (\mu_0 \mu_r) \text{ [A/m; T, H/m, -]}. \quad (6)$$

3) Magnetická indukce (B) – vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou (1m^2), kolmou na směr siločar – tj. hustotu (indukčních) siločar daného magnetického pole.

Fyzikální jednotka magnetické indukce:

- a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

1 Tesla [T],

1 voltsekunda/ m^2 [Vs/m^2], \rightarrow odvozená ze vztahu: $B = \Phi / S$ [Vs/m^2 ; Vs, m^2], (7)

- b) v mezinárodní soustavě CGS (předchůdce měrové soustavy SI):

1 Gauss [G],

- c) vzájemný přepočít fyzikálních jednotek:

1 T = 1 Vs/ m^2 = 104 G,

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$B = \mu \cdot H \text{ [T; H/m, A/m]}. \quad (8)$$

4) Permeabilita neboli prostupnost prostředí (μ) – skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Fyzikální jednotka permeability prostředí:

- a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

1 Henry na metr [H/m],

1 Tesla/ampér/m [T/(A/m)], \rightarrow ze vztahu: $\mu = B / H$ [T/(A/m); T, A/m], (9)

- b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS (předchůdce měrové soustavy SI):

1 Gauss na Oersted [G/Oe], \rightarrow odvozená ze vztahu: $\mu = B / H$ [G/Oe; G, Oe], (10)

- c) vzájemný přepočít fyzikálních jednotek:

1 H/m = 1 T/(A/m),

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mu = B / H \text{ [H/m; T, A/m]}. \quad (11)$$

5) Permeabilita neboli prostupnost vakua (μ_0) čili magnetická indukční konstanta vakua – skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) vakua:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ T/(A/m)} = 1 \text{ G/Oe} \quad (12)$$

6) Relativní (poměrná) permeabilita neboli prostupnost prostředí (μ_r) – skalární fyzikální veličina, popisující relativní magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Tato fyzikální veličina tedy vyjadřuje, kolikrát je dané prostředí magneticky polarizovatelnější (magneticky „vodivější“, prostupnější pro magnetické pole), než vakuum – je to veličina bezrozměrná.

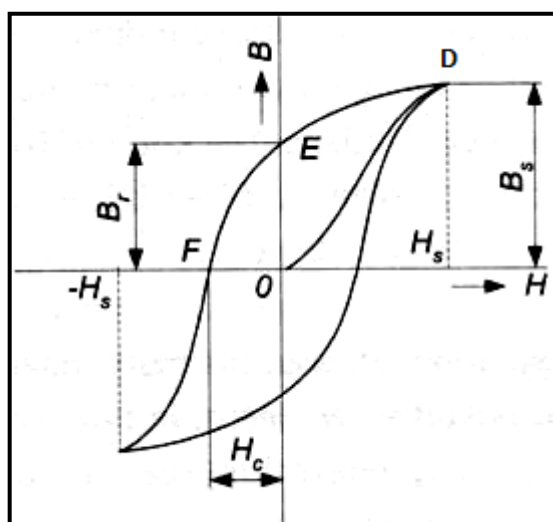
Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mu_r = B / (\mu_0 \cdot H) = \mu / \mu_0 \text{ [-; T, H/m, A/m; H/m, H/m]} \quad (13)$$

7) **Koercivita H_c [A/m]** – je taková intenzita magnetického pole, která působí proti směru spontánní magnetizace, až dosáhne celkové indukce v materiálu $B = 0$. Parametr H_c je mírou odolnosti magnetu proti odmagnetizování (vnějším polem i vlastní demagnetizací).

8) **Remanence B_r [T]** – je hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu, bez působení vnějšího magnetického pole. Z obr. 5 vyplývá, že zatímco parametr B_r je pro oba typy křivek $B(H)$, $J(H)$ shodný, neplatí totéž pro parametr H_c . Proto rozlišujeme koercivitu H_cJ a koercivitu H_cB .

9) **Maximální součin $(BH)_{\max}$ [kJ/m³]** – (někdy též nazývaný maximální energetický součin) je úměrný magnetické energii, uložené v magnetu optimálního tvaru. Parametr $(BH)_{\max}$ odpovídá interakční síle magnetu vůči jiným feromagnetickým předmětům (nejčastěji železu).



Obr. 1 - Hysterezní smyčka [1], [2], [12]

Hysterezní smyčka magnetického materiálu je uzavřená křivka magnetování, která vyjadřuje závislost $B = f(H)$ při pomalé, plynulé změně intenzity magnetického pole od $+H_s$ do $-H_s$. Intenzita magnetického pole H_s odpovídá bodu nasycení **D**. Hysterezní smyčka se získá provedením jednoho tzv. cyklu magnetování. Úsek hysterezní smyčky **OE** se nazývá remanence B_r , úsek **OF** koercivita H_c . Hysterezní smyčka, která vychází z pracovního bodu odpovídajícího magnetické indukci v magnetickém nasycení B_s , se nazývá hraniční (maximální) hysterezní smyčka. Na tvar hysterezní smyčky má vliv především chemické složení a stav krystalové mřížky, související se způsoby technologického zpracování, jako např. válcováním za studena nebo za tepla, žíháním nebo kalením. [14]

3 Magnetické vlastnosti látek a materiálů

Magnetické vlastnosti materiálů a látek posuzujeme podle toho, jak se daná látka či materiál chová ve vnějším magnetickém poli, do kterého je umístěna, nebo ve kterém se rozkládá. Po základním zkoumání magnetických vlastností různorodých materiálů a látek byly zjištěny určité společné charakteristické magnetické vlastnosti pro určité skupiny materiálů a látek. Na základě těchto měření a jejich výsledků pak byly následně definovány základní magnetické skupiny. Posuzujeme-li pak určitý konkrétní materiál nebo látku, říkáme, že daný materiál vykazuje ve vnějším magnetickém poli jednu ze základních magnetických vlastností uvedených v tab. 1: [2]

Tab. 1 - Rozdělení magnetických látek

DIAMAGNETICKÉ	PARAMAGNETICKÉ	FEROMAGNETICKÉ
$\mu_r < 1$	$\mu_r > 1$	$\mu_r \gg 1$
slabě zeslabují původní magnetické pole	slabě zesilují původní magnetické pole	výrazně zesilují původní magnetické pole
interní plyny, zlato, měď, rtuť	sodík, draslík, hliník	železo, kobalt, nikl, gadolinium
NEFEROMAGNETICKÉ LÁTKY		FEROMAGNETICKÉ LÁTKY
výsledný magnetický moment atomů je nulový	výsledný magnetický moment atomů je různý od nuly	výsledný magnetický moment atomů je různý od nuly
Diamagnetické atomy	Paramagnetické atomy	
	Náhodná orientace jednotlivých atomů	Existence mikroskopických oblastí, které jsou zmagnetovány i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole: WEISSOVY MAGNETICKÉ DOMÉNY

Dle zadání diplomové práce jsou těžištěm zájmu především feromagnetické látky a materiály, které jsou základem pro stavbu magnetických jader transformátorů. Proto budou v další části popsány pouze tyto látky a materiály.

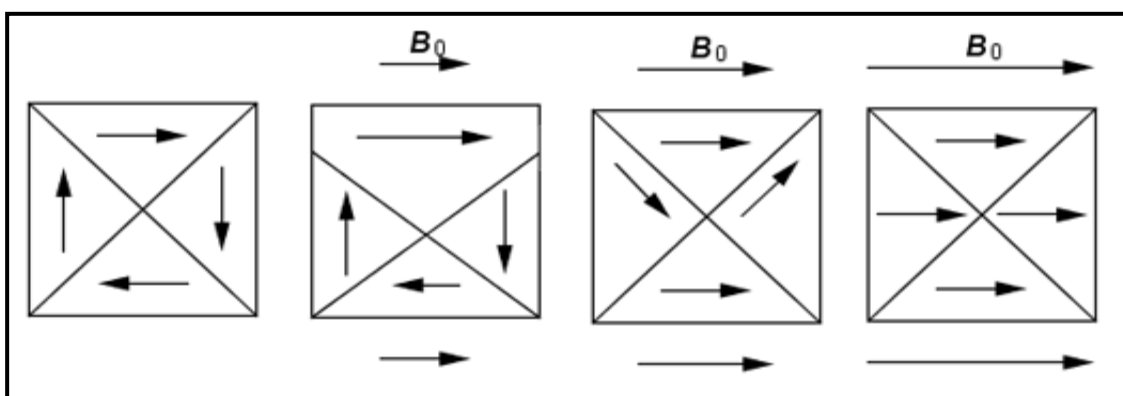
3.1 Feromagnetické látky a materiály

Relativní permeabilita feromagnetických látek je velká (10^2 až 10^5), což znamená, že tyto látky značně zesilují magnetické pole. Feromagnetismus pozorujeme za běžných teplot u čtyř prvků (Fe, Co, Ni, Gd) a u různých slitin těchto kovů. Kromě toho byl ale zjištěn i u několika slitin, jež feromagnetické prvky neobsahují. Příkladem mohou být tzv. Heuslerovy slitiny, což jsou některé slitiny manganu s cínem, hliníkem, arzénem, antimonem, vizmutem nebo borem a mědí (přitom As, Sb, Bi, B a Cu jsou dokonce diamagnetika).

Na rozdíl od diamagnetismu a paramagnetismu (jevy závislé na atomové struktuře) je feromagnetismus jev, který je závislý na uspořádání atomů (iontů) v krystalické mřížce. Samotné atomy feromagnetických látek jsou paramagnetické. O tom svědčí dva jevy. Zahřejeme-li feromagnetickou látku na určitou teplotu, zvanou **Curieova teplota**, ztrácí skokem svoje feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickou látkou (např. pro železo je tato teplota přibližně 768 °C). Při této teplotě se výrazně porušuje uspořádání atomů v krystalické mřížce. Při ochlazení pod Curieovu teplotu se stává odagnetovaným feromagnetikem. V silných magnetických polích se feromagnetické látky stávají paramagnetickými.

Zvláštní skupinu magnetických materiálů tvoří ferimagnetické látky čili ferity. Jsou to sloučeniny oxidu železa s oxidy jiných kovů (Mn, Ba), které značně zesilují magnetické pole, a jejich předností je, že ve srovnání s kovovými feromagnetickými materiály mají mnohem větší elektrický odpor, proto se uplatňují v elektrotechnice.

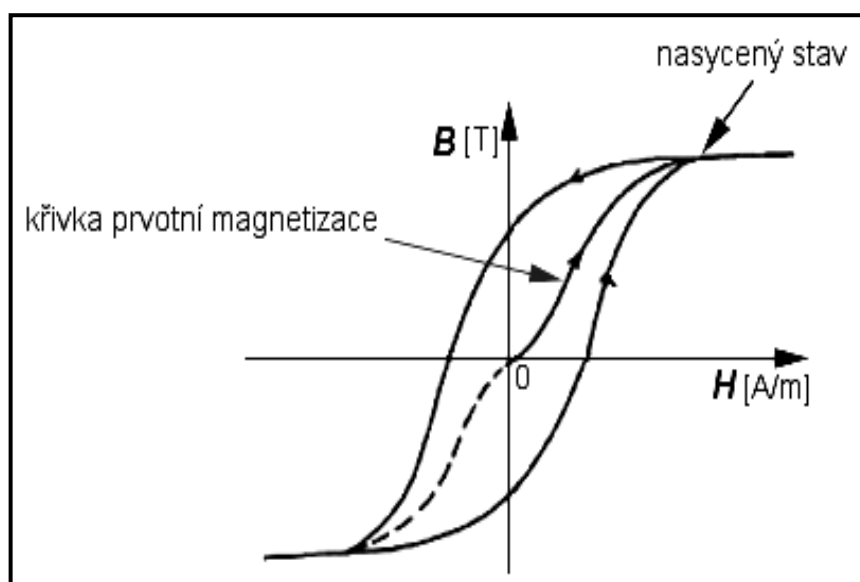
Feromagnetické látky mají doménovou strukturu. Doménová struktura jsou mikrooblasti ve feromagnetiku, které se vyznačují spontánní magnetizací shodného směru. Není-li taková feromagnetická látka vložena do vnějšího magnetického pole, jsou směry magnetických momentů v každé doméně obecně jiné, takže výsledek, jenž získáme jejich součtem je nulový a feromagnetická látka se jeví navenek jako nemagnetická.



Obr. 2 - Magnetizace látky (zleva: domény orientovány nahodile - vložení látky do vnějšího magnetického pole - souhlasná orientace domén - látka magneticky nasycena)

Při zvětšování vnější magnetické indukce se vektory spontánní magnetizace v jednotlivých oblastech (zónách, doménách) skokem natočí do směru vnějšího magnetického pole. Stav nasycení nastává, když všechny vektory vnitřní magnetizace jsou natočeny do směru vnějšího magnetického pole. Ačkoli Weiss vnitřní pole ve feromagnetikách předpověděl, nedokázal jeho existenci vysvětlit. Vysvětlení podstaty tohoto pole podali až později Jakov Iljič Frenkel a Werner Heisenberg na základě existence výměnných sil kvantové povahy mezi elektrony sousedních atomů.

Vložíme-li odmagnetovanou feromagnetickou látku do vnějšího magnetického pole a budeme-li postupně zvyšovat intenzitu magnetického pole H , pak získáme křivku prvotní magnetizace. Při určité hodnotě intenzity magnetického pole se dosáhne nasyceného stavu, kdy magnetická indukce B roste jen nepatrně.



Obr. 3 - Hysterezní smyčka a křivka (prvotní)magnetizace

Budeme-li nyní intenzitu magnetického pole snižovat bude křivka závislosti magnetické indukce B na intenzitě vnějšího magnetického pole H vypadat jinak, dostaneme tzv. hysterezní křivku (hystereze = zpoždování). Při nulové intenzitě magnetického pole zůstane látka ještě zmagnetovaná.

Hysterezní smyčky jednotlivých feromagnetik se od sebe liší tvarem i obsahem plochy, kterou ohraničují. Podle tvaru hysterezní smyčky rozlišujeme feromagnetické látky na **magneticky měkké** s velmi úzkou hysterezní smyčkou a na **magneticky tvrdé** s širokou hysterezní smyčkou. [13]

3.1.1 Magneticky měkká feromagnetika

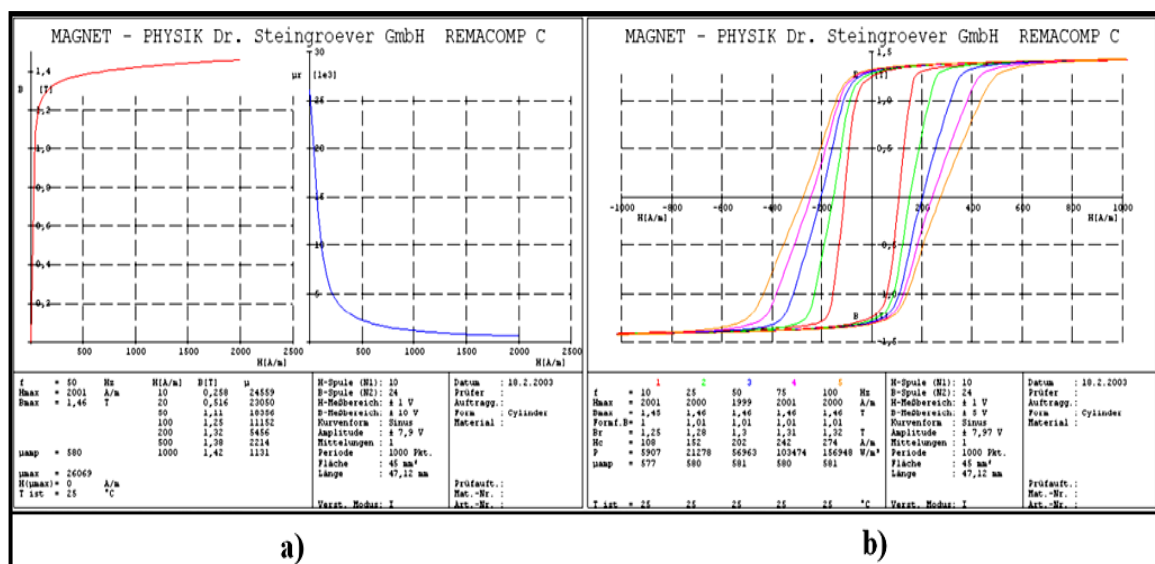
Vyznačují se strmou panenskou magnetizační křivkou a úzkou hysterezní smyčkou o malé ploše. Mají úzkou hysterezní smyčku a tudíž malé hysterezní ztráty. Snadno se přemagnetovávají, proto se používají na magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů např. transformátory. [13]

Požaduje se od nich:

- velká permeabilita,
- malá koercitivní síla,
- pokud možno vysoká indukce,
- odolnost proti stárnutí.

Charakteristické křivky:

- **magnetizační křivky**
(prvotní nebo amplitudové, statické nebo pro definovanou frekvenci budícího pole, rovněž je důležité zvažovat tvar signálu budícího pole);
- **křivky relativní permeability**
(závislost $\mu_r = f(H)$, určená z BH nebo magnetizační charakteristiky);
- **amplitudové BH charakteristiky**
(určené statickým magnetováním nebo pro definovanou frekvenci a tvar budícího pole).



Obr. 4 - Základní charakteristiky feromagneticky měkkého materiálu

a) magnetizační křivka a křivka relativní permeability

b) amplitudové BH charakteristiky pro různé frekvence budícího pole ($f = 10 \text{ Hz}$, 25 Hz , 50 Hz , 75 Hz , 100 Hz)

Z těchto charakteristik lze následně získat další důležité údaje popisující daný materiál. Patří sem například tyto parametry:

Charakteristické parametry:

- statická relativní permeabilita (μ_r),
- počáteční relativní permeabilita ($\mu_{poč}$),
- maximální relativní permeabilita (μ_{max}),
- reverzibilní relativní permeabilita (μ_{rev}),
- koercitivní síla H_c (A/m),
- remanentní magnetizace B_r (T),
- hysterezní ztráty P (W/m³, W/kg),
- a další. [2]

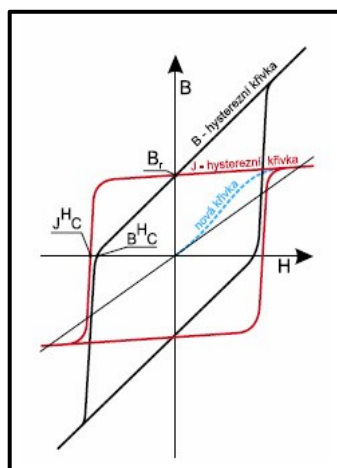
3.1.2 Magneticky tvrdá feromagnetika

Pro trvalé magnety se používají materiály, označované souhrnně termínem "magneticky tvrdé materiály". Jejich základní magnetickou vlastností je schopnost zachovat značnou magnetickou polarizaci po ukončení působení vnějšího magnetického pole. Jsou to feromagnetické materiály s koercivitou větší než 5 kA/m. Magneticky tvrdé materiály se používají k výrobě permanentních magnetů sloužících jako zdroj stejnosměrného magnetického toku. Nejčastější použití permanentních magnetů je v systémech založených na jejich silovém působení na jiná feromagnetika (např. magnetická tabule) nebo na proudovodiče (stejnosměrné motory, magnetoelektrický ručkový měřicí přístroj) nebo na jevech elektromagnetické indukce (např. dynamo).

Základní parametry popisující feromagneticky tvrdé materiály jsou $B = f(H)$ a $J = f(H)$ charakteristiky, nebo se z těchto charakteristik dále určují. Na rozdíl od materiálů magneticky měkkých, u kterých nás nejvíce zajímá magnetizační křivka v prvním kvadrantu, je u magneticky tvrdých materiálů stěžejní kvadrant druhý, obsahující tzv. demagnetizační charakteristiku. Tyto charakteristiky je možné uvádět ve tvaru $B = f(H)$, jakožto velikosti magnetické indukce v závislosti na intenzitě pole, nebo ve tvaru $J = f(H)$ jakožto magnetická polarizace v závislosti na intenzitě pole. Tato druhá charakteristika je u permanentních magnetů udávána častěji, neboť jsou z ní jasněji vidět magnetické vlastnosti samotného materiálu magnetu. Z těchto charakteristik lze pak následně určit další stěžejní parametry popisující magnetické vlastnosti materiálů. [1], [2], [12]

Charakteristické parametry:

- koercitivní síla H_cJ , H_cB (A/m),
- remanentní magnetizace B_r (T),
- maximální energetický součin BH_{max} (kJ/m³, W/m³).



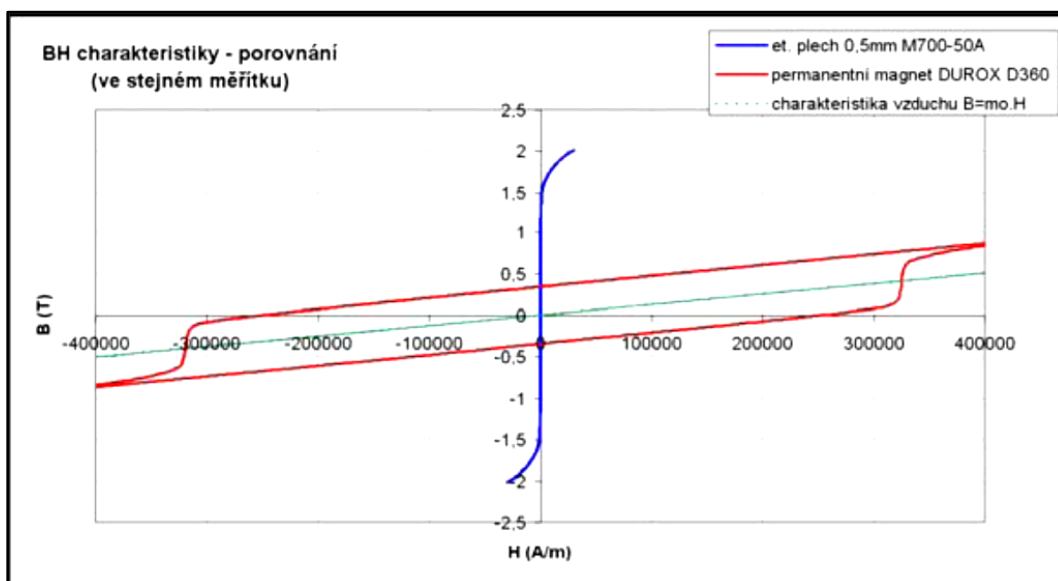
Obr. 5 - Základní charakteristiky feromagneticky tvrdého materiálu

3.1.3 Porovnání magneticky měkkého a tvrdého feromagnetika

Jak dalece se mohou lišit magnetické vlastnosti těchto dvou skupin feromagnetik, uvádím pro názornost na následujícím obr. 6. Zde jsou uvedeny skutečně změřené magnetické vlastnosti konkrétních materiálů pro jeden materiál magneticky měkký a jeden magneticky tvrdý.

a) *plechy pro elektrotechniku*: M700-50A – Košice, tloušťka 0,5 mm, frekvence magnetického pole $f = 50$ Hz (měřeno pomocí systému REMACOMP a SST pólového nástavce, uvedena BH charakteristika)

b) *permanentní magnet*: DUROX D360, Magnety a.s. (měřeno pomocí systému PERMAGRAPH-C, uvedena BH a JH charakteristika) [2]



Obr.6 - Zobrazení charakteristik obou materiálů ve stejném měřítku pro porovnání

4 Normy ČSN EN pro elektrotechniku

- **ČSN EN 10106**

Evropská norma, která platí pro izotropní plechy a pásy pro elektrotechniku válcované za studena se jmenovitými tloušťkami 0,35 mm; 0,50 mm; 0,65 mm a 1,00 mm.

- **ČSN EN 10107**

Evropská norma, která platí pro anizotropní plechy a pásy dodávané v žíhaném stavu se jmenovitými tloušťkami 0,23 mm; 0,27 mm; 0,30 mm a 0,35 mm.

- **ČSN EN 10126**

Plechý a pásy pro elektrotechniku válcované za studena z nelegovaných ocelí dodávané bez závěrečného žíhání (označované jako semifiniš).

- **ČSN EN 10165**

Plechý a pásy pro elektrotechniku válcované za studena z legovaných ocelí dodávané bez závěrečného žíhání (rovněž semifiniš).

- **ČSN EN 10251**

Magnetické materiály – způsoby stanovení geometrických vlastností ocelových plechů a pásů pro elektrotechniku.

- **ČSN EN 10280**

Magnetické materiály – metody měření magnetických vlastností plechů a pásů pro elektrotechniku jednoduchým tabulovým měřicím přístrojem.

- **ČSN EN 10282:2001**

Magnetické materiály – metody zkoušení povrchového izolačního odporu plechů a pásů pro elektrotechniku.

- **ČSN EN 60404-2**

Magnetické materiály – část 2: Metody měření magnetických vlastností ocelových tabulí a pásů pro elektrotechniku Epsteinovým přístrojem.

4.1 Termíny a definice normy ČSN EN 10107

4.1.1 Šavovitost (edgcamber)

Největší vzdálenost mezi podélnou hranou plechu a přímkou spojující dva nejvyšší úseky okraje měřené délky na této hraně.

4.1.2 Rovinnost (flatnes)

Vlastnost plechu nebo úseku pásu, která je charakterizována vlnitostí, což je poměr výšky vlny k její délce.

4.1.3 Počet ohybů (numberofbends)

Maximální počet střídavých ohybů, při kterých se v základním kovovém materiálu objeví trhлина viditelná vizuálně: je podstatou hodnocení tvárnosti materiálu.

4.1.4 Vnitřní pnutí (internalstresses)

Je pnutí, které je charakterizováno úchylkou od přímky při stříhání.

4.2 Třídění a označování normy ČSN EN 10107

4.2.1 Třídění

Značky ocelí, pro které platí tato evropská norma, jsou rozděleny podle maximální hodnoty měrných ztrát, uváděny ve wattech na kilogram a podle jmenovité tloušťky výrobku (0,23 mm; 0,27 mm; 0,30 mm a 0,35 mm).

4.2.2 Označování

Jednotlivé značky ocelí, pro které platí tato norma, se označují podle EN 10027-1. Číselné označení ocelí se provádí podle EN 10027-2. Označování ocelí se skládá ze symbolů uváděných v tomto pořadí:

1. Písmeno M pro elektrotechnickou ocel.
2. Stonásobek jmenovité hodnoty maximální měrné ztráty při 50 Hz ve W/kg, při odpovídající jmenovité tloušťce výrobku a při 1,7 T.
3. Stonásobek jmenovité tloušťky výrobku v mm.
4. Charakteristické písmeno:
 - S pro běžné anizotropní výrobky,
 - P pro anizotropní výrobky s vysokou permeabilitou.

Příklad: Běžný anizotropní elektrotechnický plech nebo pás s měrnými ztrátami maximálně 1,50 W/kg při 1,7 T a 50 Hz, jmenovitá tloušťka 0,30 mm, dodávaný v tepelně zpracovaném stavu: M150-30S.

4.3 Všeobecné požadavky ČSN EN 10107

4.3.1 Způsob výroby

Způsob výroby oceli a její chemické složení volí výrobce.

4.3.2 Způsob dodávání

Plech se dodává ve svazcích, pásy ve svitcích. Hmotnost svazků plechu a svitků se dohodnou při objednávání. Doporučený vnitřní průměr svitku je přibližně 508 mm. Svitky se musí navíjet dostatečně těsně, nesmí se zbortit svou vlastní hmotností. Svitky, které obsahují svary, se musí skládat z pásů stejné značky.

4.3.3 Podmínky dodávky

Anizotropní výrobky jsou obvykle dodávány s izolačním povlakem povrchu, který je na obou stranách výrobku. Tato izolace se obvykle skládá ze sklovitého filmu, obsahujícího silikáty hořčíku a na tento základní film je nanášena druhá vrstva, složená z anorganických složek, jako jsou fosforečnany. Obvykle se tato druhá vrstva nanáší při rovnání za tepla.

4.3.4 Stav povrchu

Povrch musí být hladký a čistý, bez mastnoty a rzi. Rozptýlené vady, např. trhliny, škrábance, puchýřky apod., jsou dovoleny tehdy, pokud nepřekročí mezní úchytky tloušťky a pokud nejsou na závadu dodávanému výrobku.

Izolační povlak výrobku musí mít dobrou přilnavost, aby během stříhání nebo tepelného zpracování, které specifikuje výrobce, nedošlo k jeho odlupování.

4.3.5 Vhodnost ke stříhání

Plech a pásy musí být možné stříhat v libovolném místě a do obvyklých tvarů, při použití bezvadných nástrojů a při pečlivé práci.

4.4 Technické požadavky ČSN EN 10107

4.4.1 Magnetické vlastnosti

4.4.1.1 Magnetická polarizace

Minimální hodnoty magnetické polarizace pro intenzitu magnetického pole 800 A/m (vrcholová hodnota) jsou uvedeny v tab. 8.

4.4.1.2 Měrné ztráty

Maximální hodnoty měrných ztrát při 50 Hz jsou uvedeny v tabulce 8. Platí pro zkušební vzorky ve stavu po stárnutí, stříhané rovnoběžně se směrem válcování.

U Epsteinových pásků musí být po stříhání provedeno odstranění vnitřního pnutí, toto tepelné zpracování je věcí výrobce. [21]

4.5 Rozměry a mezní úchytky rozměru a tolerance tvaru ČSN EN 10107

4.5.1 Tloušťka

Jmenovité tloušťky výrobků jsou 0,23 mm; 0,27 mm; 0,30 mm a 0,35 mm.

Úchytky tloušťky se rozlišují:

- a) mezní úchytky jmenovité tloušťky v rámci jedné zkušební jednotky,
- b) rozdíl tloušťky plechu nebo úseku pásu měřené ve směru válcování,
- c) rozdíl tloušťky měřené kolmo na směr válcování. Tento rozdíl se týká pouze výrobků nad 150 mm.

Mezní úchytky tloušťky měřené v libovolném místě v rámci jedné zkušební jednotky nesmí být větší než $\pm 0,030$ mm od jmenovité tloušťky, kromě plechů se jmenovitou tloušťkou 0,23 mm, u kterých tato mezní úchytky nesmí překročit $\pm 0,025$ mm. Zvýšení tloušťky plechů a pásů vlivem svarů nesmí překročit 0,050 mm.

Rozdíl tloušťky plechu nebo úseku pásu délky 1,5 m, měřený ve směru válcování, nesmí překročit 0,030 mm.

Kromě toho, u výrobků s šířkou nad 100 mm, nesmí být rozdíl tloušťky, měřený v příčném směru, větší než 0,020 mm. Měření se provádí minimálně 40 mm od okrajů.

4.5.2 Šířka

Obvyklé jmenovité šířky jsou $\leq 1\,000$ mm. Výrobky se dodávají ve výrobních šířkách nebo v šířkách pro konečné použití výrobku.

Mezní úchylky šířky:

- a) pro výrobky dodávané ve výrobních šířkách jsou mezní úchylky $^{+2}_0$ mm.
- b) pro výrobky dodávané v šířkách pro konečné použití jsou mezní úchylky uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 - Mezní úchylky šířky

Jmenovitá šířka l (mm)	Mezní úchylky (mm)
$l \leq 150$	$\begin{matrix} 0 \\ -2 \end{matrix}$
$150 < l \leq 400$	$\begin{matrix} 0 \\ -3 \end{matrix}$
$400 < l \leq 750$	$\begin{matrix} 0 \\ -5 \end{matrix}$
$l > 750$	$\begin{matrix} 0 \\ -6 \end{matrix}$
a) Při objednávání lze dohodnout kladné mezní úchylky šířky	

4.5.3 Délka

Mezní úchylka délky plechů je závislá na objednané délce, maximálně je však +6 mm.

4.5.4 Šavlovitost

Měření šavlovitosti se neprovádí u výrobků s šířkou ≤ 150 mm. Šavlovitost na délce 1,5 m nesmí být větší než 0,5 mm.

4.5.5 Rovinnost (vlnitost)

Prověřování rovinnosti se neprovádí u výrobků s šířkou ≤ 150 mm. Vlnitost se uvádí v procentech a nesmí překročit hodnotu 1,5 %.

4.5.6 Zbytkové prohnutí

Prověřování hodnot zbytkového prohnutí se může dohodnout při objednávání pro výrobky s šířkou nad 150 mm.

V tomto případě však vzdálenost mezi dolní hranou zkušební vzorku a nosným plechem nesmí být větší než 35 mm a platí pouze pro dodávky ve svitcích.

4.5.7 Výška otřepů

Měření výšky otřepů se provádí pouze u výrobků dodávaných v šířce pro konečné použití. Výška otřepů nesmí překročit 0,025 mm. [21]

4.6 Technologické vlastnosti ČSN EN 10107

4.6.1 Hustota

Hustota výrobků není specifikována. Obvyklá hodnota hustoty, která je základem pro výpočet magnetických vlastností a činitele zaplnění, je $7,65 \text{ kg/dm}^3$.

4.6.2 Činitel zaplnění

Minimální hodnoty činitele zaplnění jsou uvedeny v tab. 8.

4.6.3 Počet ohybů

Minimální počet ohybů je 1. Hodnoty platí pro zkušební vzorky stříhané ve směru válcování.

4.6.4 Vnitřní pnutí

Výrobky by měly být pokud možno bez vnitřního pnutí. Měření vnitřního pnutí se neprovádí u výrobků s šířkou pod 500 mm (podél dělený materiál). Naměřená mezera nesmí být větší než 1 mm.

4.6.5 Odpor izolační vrstvy

Minimální hodnoty odporu izolační vrstvy, měřeného před nebo po odstranění vnitřního pnutí, dohodne odběratel s výrobcem při objednávání. Způsob odstranění vnitřního pnutí, pokud se provádí, je věcí výrobce.

Elektrický odpor povrchové izolační vrstvy se uvádí v Ω/mm^2 . Je to elektrický odpor, který překonává elektrický proud při průchodu izolační vrstvou. [21]

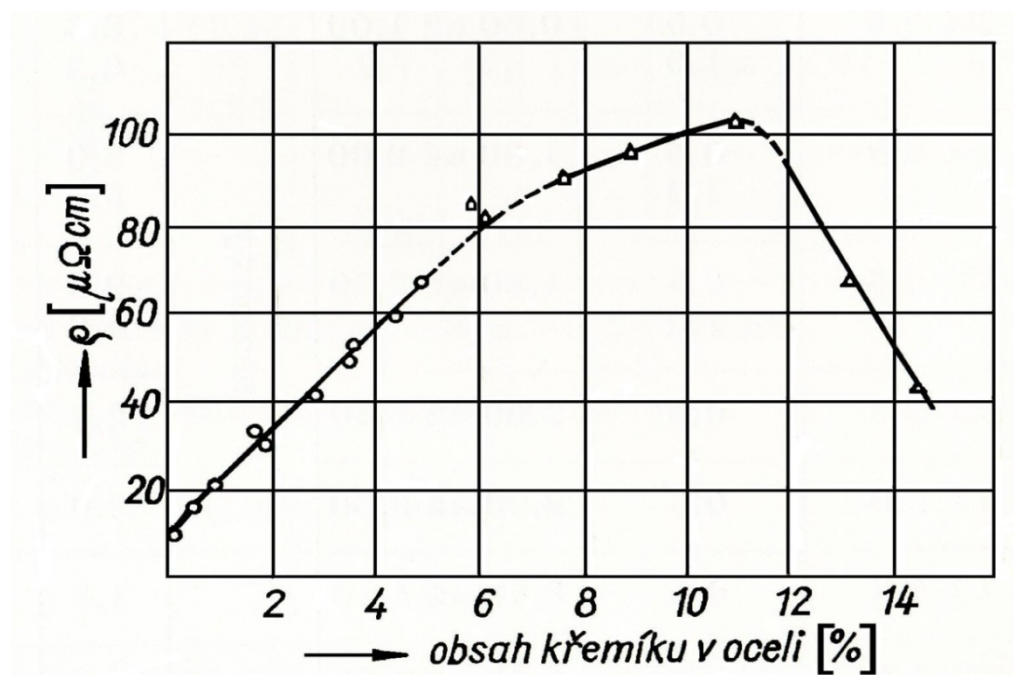
5 Plechy a pásy pro magnetické obvody a jádra

Elektrotechnické plechy a pásy zařazujeme do skupiny magneticky měkkých materiálů, které jsou nejčastěji vyráběny z oceli s přídavkem křemíku. Vyznačují se speciálními elektromagnetickými vlastnostmi, díky kterým jsou základním příspěvkem k energetické efektivnosti v elektrických obvodech. Magnetické vlastnosti elektrotechnických plechů a pásů jsou definované především obsahem křemíku (do 4,5 %) a určeným množstvím uhlíku, dusíku, hliníku, manganu a síry s důrazem na maximální čistotu oceli.

5.1 Plechy z křemíkové oceli

Slitiny železa s křemíkem patří k nejvíce používaným magnetickým materiálům v elektrotechnice. Jejich výhodné vlastnosti objevili Barret, Brown a Hadfield koncem 19. století, když zjistili výrazný vliv přísady 2 % až 3 % křemíku v železe na měrné ztráty při magnetizaci ve střídavém poli.

Obsah křemíku v oceli, který se většinou pohybuje mezi 0,8 % až 4,5 % značně zvyšuje elektrický odpor oceli (při obsahu 4 % až 5 % Si se odpor zvýší asi 6krát než odpor čistého železa – viz obr. 7) a díky tomu se zmenšují ztráty vířivými proudy. [7]



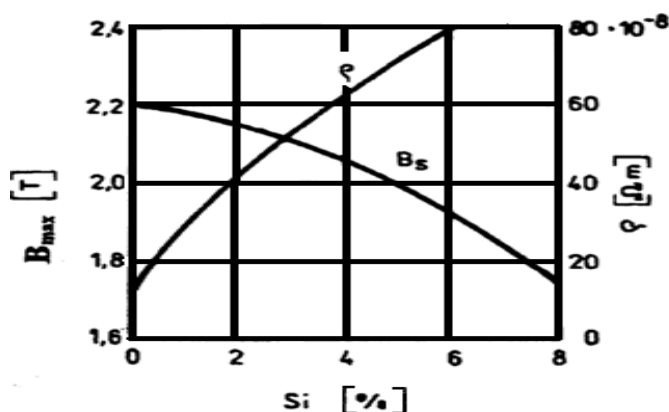
Obr. 7 - Měrný elektrický odpor slitin čistého železa a křemíku

Z křemíkových ocelí se vyrábějí ve velkém množství plechy na magnetické obvody elektrických strojů točivých (generátory, motory, dynama) i netočivých (transformátory). Hlavní požadavky na tyto plechy jsou co nejvyšší permeabilita, malé měrné ztráty při střídavém

magnetování, velká indukce nasycení a nízká cena. Ocel na výrobu těchto plechů musí být co nejčistší. Všechny příměsi kromě křemíku jsou škodlivé. Křemík působí v oceli převážně příznivě:

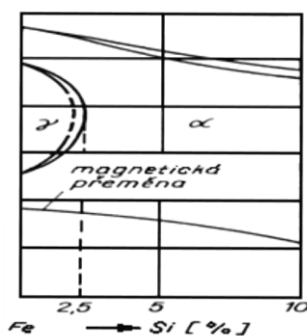
- silně odkysličuje,
- zmenšuje rozpustnost železa pro uhlík a dusík,
- podporuje vznik hrubozrnné struktury,
- činí ocel méně náchylnou ke stárnutí,
- zvětšuje měrný elektrický odpor,
- zmenšuje koercitivní sílu.

Příznivé vlastnosti křemíku stoupají s jeho obsahem v železe. Množství křemíku je ale omezeno, protože se zvyšujícím se obsahem křemíku sice stoupá odpor, ale současně se zvyšuje tvrdost a hlavně křehkost materiálu, což zvyšuje obtížnost jak jejich výroby (obtížné je potom především válcování), tak i jejich zpracování (lisování). Do obsahu 2,5 % Si se plasticita oceli příliš nemění, ale pak již rychle klesá. Hranice technologické válcovatelnosti je 4,5 % Si (prakticky je ocel za studena tvářitelná do 3,5 % Si). S rostoucím obsahem křemíku současně klesá i indukce nasycení, protože s rostoucím křemíkem klesá polarizace nasycení obr. 8. [5], [4], [9]



Obr. 8- Vliv obsahu Si na B_{max} a ρ

Křemík zužuje oblast existence austenitu a od 2,5 % Si již nenastává přeměna α - γ , takže ocel je feritickou. Na obr. 9 je znázorněn rovnovážný diagram slitin železa a křemíku do 10 %. [4]



Obr. 9 - Rovnovážný diagram Fe – Si

5.2 Rozdělení plechů a pásů pro elektrotechniku

I. Neorientované (non grain-oriented) plechy

- mají magnetické vlastnosti ve všech směrech prakticky stejné

II. Orientované (grain-oriented) plechy

- jejich magnetické vlastnosti jsou výrazně směrově závislé (v různých směrech různé vlastnosti)

Magnetické vlastnosti, které se směrem prakticky nemění, jsou materiály neorientované, neboli izotropní. Pokud jsou magnetické vlastnosti výrazně směrově závislé, nazývají se orientované neboli anizotropní. Anizotropie magnetických vlastností elektrických ocelových plechů a pásů je založena na krystalové anizotropii železa. Železo a jeho slitiny krystalizují v kubické soustavě (jak prostorově centrované, tak i plošně centrované). [9]

5.2.1 Neorientované plechy a pásy

Neorientované materiály se také nazývají izotropní materiály. Jsou vhodné především pro magnetické obvody točivých strojů (motory, generátory), kde vektor indukce mění při magnetování svůj směr v čase.

Dřívější křemíkové plechy válcované za tepla jsou dnes již nahrazeny pásy z křemíkových ocelí válcovaných za studena. Pro točivé stroje, u nichž se vyžaduje izotropní materiál, se používají plechy a pásy se sníženým obsahem křemíku, u nichž je tvorba Gossovy textury potlačena. Izotropní materiály se také používají pro malé transformátory, tlumivky apod., kdy rozměry a energetické ztráty nejsou rozhodující. Používané tloušťky těchto plechů a pásů jsou nejčastěji 0,65 mm; 0,50 mm; 0,35 mm a někdy i tenčí. Velikost zrna se pohybuje mezi 20 μm a 200 μm . Pásy jsou obvykle dodávány s kontinuálně nanesenou organickou nebo organicko-anorganickou izolací povrchu zlepšující razitelnost. Tloušťka vrstvy je 5 μm . [5], [9]

5.2.1.1 Elektrotechnické plechy Et

Elektrotechnické plechy Et byly válcované za tepla a dělily se na plechy transformátorové (3,5 % až 4,5 % Si a ztrátovým číslem do 1,8 W/kg) a dynamové (0,3 % až 3,5 % Si a ztrátovým číslem nad 1,8 W/kg). Obsah uhlíku byl od 0,05 % do 0,08 % C. Protože měrné ztráty charakterizují jakost plechu, byly zavedeny do číselného označení jakosti. Například plech Et 23 byl elektrotechnický plech se jmenovitými ztrátami v železe $\Delta p_{1,0} = 2,3$ W/kg. Vedle ztrát $\Delta p_{1,0}$ byly v normě uvedeny i ztráty $\Delta p_{1,5}$. Bylo to zcela na místě, protože pracovní bod transformátorových plechů byl v té době zpravidla kolem 1,5 T. [6], [7]

Je třeba říci, že tyto elektrotechnické plechy se už nevyrábějí. Poslední vyráběný typ u nás byl plech Et 1,3 v tloušťce 0,35 mm a Et 1,3s v tloušťce 0,5 mm. Plech Et 1,3 byl za studena doválcovaný pro zvýšení činitele plnění, který vzrostl z 92 % na 96 % a byl nejkvalitnějším typem elektrotechnických ocelí, které u nás byly vyráběny technologií „za tepla“.

Čísla charakterizující tvrdost plechů se určují počtem ohybů 180° ve směru válcování a ve směru kolmém k tomuto směru. Proto počet ohybů je velice důležitý k posouzení materiálu pro další zpracování. Čím menší počet ohybů snese, tím je materiál tvrdší a křehčí. Vlivem tvrdšího materiálu se rychleji otupují nástroje. Z transformátorového plechu Et 1,3 šlo nástrojem bez přebroušení zhotovit asi jen 100 000 výseků a 300 000 výseků z dynamové oceli Et 2,6. A pro srovnání z plechu Ei až 900 000 výseků. Důvodem toho bylo, že pro elektrotechnické plechy Et byl charakteristický vyšší obsah křemíku než u plechů Ei. [8]

5.2.1.2 Elektrotechnické plechy Ei

Elektrotechnické plechy Ei jsou válcované za studena. Jejich magnetické vlastnosti měřené v různých směrech, především ve směru válcování nebo kolmo k němu, mají rozdíl pouze kolem 10 %. Oproti plechům Et mají plechy Ei podstatně nižší ztráty a to převážně složku hysterezních ztrát. Díky technologii se však zlepšují i mechanické vlastnosti, jako je činitel plnění a hladší povrch. K spotřebiteli se pásy dodávají ve svitkách o váze 1 t až 4 t (zaleží na požadavku zákazníka) a o průměru svitku do 1,2 m a šíři pásu od 500 mm do 1000 mm. Výroba výseků ze svitků umožňuje u výrobců elektrických strojů využít progresivní technologie, např. lisování automatickými rychlolisy. Tato technologie však vyžaduje dobré a rovnoměrné mechanické vlastnosti pásů.

Plech Ei se vyrábějí v kvalitě Ei 33, Ei 35, Ei 40, Ei 45, Ei 50, Ei 55, Ei 60, Ei70, Ei 80 o tloušťkách 0,50 mm a 0,65 mm ± 8 %. Čísla znamenají ztráty v desetinách W/kg při $B = 1,5$ T a $f = 50$ Hz. Ztráty a indukce jsou uvedeny v tabulce 3. Z dalších vlastností jsou významné:

- klínovitost, která při šířce pásu od 300 mm do 500 mm a při tloušťce 0,5 mm napříč pásu musí být menší jak 0,002 mm,
- pevnost v tahu 280 N/mm² až 450 N/mm²,
- tažnost 15 % až 25 %,
- stárnutí max. 6 % při $p_{1,5}$ a 150 °C/150 h,
- anizotropie B_{25} (rozdíl ve směru a kolmo ke směru válcování) menší jak 0,13 T.

Výseky nevyžadují dodatečné tepelné zpracování. Plechy Ei mají oproti Et a Eo nižší obsah křemíku (1 % až 1,6 %). Vlivem stárnutí dochází ke změně tvaru hysterezní smyčky. [8]

Tab. 3 - a) Průměrné magnetické vlastnosti zjištěné při kmitočtu 50 Hz a harmonickém průběhu magnetické indukce (pro porovnání jsou uvedeny vlastnosti Et 2,3)

b) Průměrné vlastnosti nově připravovaných druhů

Tloušťka [mm]	Jakost	P _{1,0} [W/kg]	P _{1,5} [W/kg]	Plnění [%]	Magnetická indukce [T] při amplitudě mag. pole [A/m]						μ _{max} při H~100 [A/m]	μ ₈₀
					1000	2500	5000	10000	20000	30000		
0,50	Ei 33	1,35	3,21	97,5	1,43	1,54	1,64	1,76	1,83	1,96	7300	
	Ei 35	1,40	3,41	97,5	1,45	1,56	1,66	1,78	1,84	1,97	6800	1300
	Ei 40	1,60	3,81	97,5	1,46	1,57	1,67	1,79	1,85	1,98	6000	
	Ei 45	1,75	4,00	97,5	1,48	1,59	1,69	1,81	1,87	1,99	5800	
	Ei 50	1,88	4,36	97,5	1,49	1,60	1,70	1,82	1,87	2,00	5600	
	Ei 55	2,18	4,80	97,5	1,50	1,62	1,71	1,83	1,88	2,01	5200	
	Ei 60	2,49	5,41	97,5	1,51	1,62	1,71	1,83	1,88	2,02	4400	
	Ei 70	2,83	6,06	97,5	1,52	1,63	1,72	1,84	1,89	2,03	3900	
0,65	Ei 80	3,00	6,75	97,5	1,52	1,63	1,72	1,84	1,89	2,03	3600	
	Ei 55	2,19	4,86	98	1,46	1,57	1,67	1,79	1,87	1,98	5600	
	Ei 60	2,50	5,56	98	1,51	1,62	1,71	1,83	1,89	2,02	5200	
	Ei 70	2,90	6,27	98	1,51	1,62	1,71	1,83	1,89	2,02	4300	
0,5	Ei 80	3,30	7,13	98	1,52	1,63	1,72	1,84	1,89	2,03	3900	
	Et 2,3	2,2	5,6	94,5		1,47		1,72	1,82	1,94	3500	500

a)

Tloušťka [mm]	Jakost	$P_{1,0}$ [W/kg]	$P_{1,5}$ [W/kg]	B_{2500} [T]
0,50	Ei 33	1,37	3,25	1,55
	Ei 31	1,27	3,05	1,55
	Ei 29	1,17	2,85	1,55
0,35	Ei 33	1,33	3,20	1,55
	Ei 30	1,23	2,95	1,55
	Ei 27	1,13	2,65	1,55

b)

5.2.2 Orientované plechy a pásy

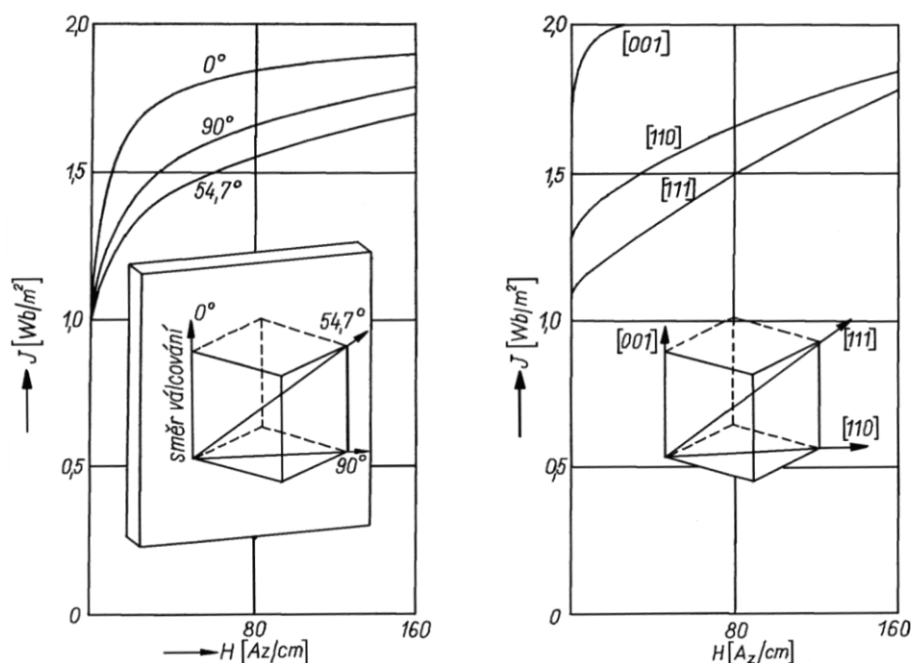
Orientované Fe-Si materiály mají polykrystalickou strukturu, ve které jsou všechny krystaly orientovány do nejvýhodnějšího směru z pohledu celkových ztrát při magnetizaci. S rostoucí odchylkou od tohoto směru se magnetické vlastnosti zhoršují. U standardních materiálů je tato odchylka od směru válcování do 9° a u materiálů s vysokou permeabilitou do 3°. Velikost zrna se zvýšila na několik milimetrů až centimetrů. Obsah křemíku se pohybuje mezi 2,8 % až 3,2 %. Jejich magnetické vlastnosti ve směru válcování představují dnes nejlepší jakost. V důsledku nízkých ztrát ve směru válcování se tyto materiály používají tam, kde indukce nemění svůj směr (transformátory). A díky větší pracovní magnetické indukci těchto pásů a plechů je možno zmenšit rozměry a hmotnost výrobku a tím i cenu. Technologie a výroba je oproti neorientovaným plechům a pásům velmi složitá a náročná. V zahraničí jsou označovány jako GOES (Grain Oriented Electrical Steel). Plechy jsou vyráběny s vysokou indukcí (HGO) a konvenční s nižší indukcí (CGO).

Používají se dva typy orientovaných ocelí:

- pásy s Gossovou texturou,
- pásy s kubickou texturou.

5.2.2.1 Pásy s Gossovou texturou

Pásy s Gossovou texturou mají pouze jeden směr snadného magnetování a tím je směr válcování, kdežto ve všech ostatních směrech jsou ztráty podstatně vyšší. Krystalografická textura (110) [001], zvaná Gossova, se vyznačuje takovým pravidelným uspořádáním převážně většiny zrn, kdy krystalografický směr [001] v mřížce křemíkového feritu, který je současně směrem nejsnadnější magnetizace, leží ve směru válcování a rovina (110) v rovině plechu. A naopak nejobtížnější směr magnetizace [111] je pak pod úhlem 55° ke směru válcování. Průběh křivek magnetizace pro různé krystalografické směry jak monokrystalu, tak polykrystalického plechu z 3 % křemíkové slitiny je na obr. 11. [5], [7], [9]



Obr. 11 - Směrová závislost magnetizace polykrystalické, za studena válcované křemíkové oceli se 3 % Si (vlevo) a monokrystalu slitiny železa s 3,85 % Si (vpravo)

Pásy s Gossovou texturou se nejčastěji používají pro střední a velké transformátory, kde magnetický tok teče jedním směrem. Ale jsou i využívány u velkých točivých strojů. Požadavky na vlastnosti GOES pásů jsou dány z funkce transformátoru:

- dlouholetá spolehlivost a neměnnost vlastností,
- minimální ztráty energie při transformaci,
- nízký hluk.

GOES plechy musí pro výrobu transformátorů jader splňovat tyto parametry:

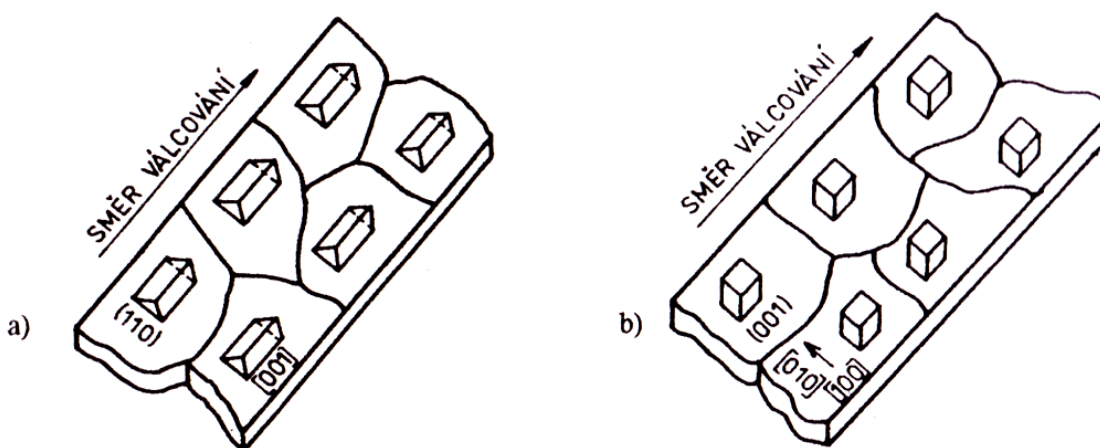
- maximální magnetickou polarizaci,
- minimální ztráty,
- předepsané mechanické a geometrické vlastnosti.

Novou generací orientovaných křemíkových ocelí s výrazně lepšími vlastnostmi jsou materiály s vysokou indukcí označované HiB (highinduction), u nichž se průměrná desorientace krystalů snížila z 9° na 3° od orientace ideální a velikost zrna se zvýšila ze 3 mm na 9 mm. [5], [9]

5.2.2.2 Pásy s kubickou texturou

Na základě usilovného vývoje se podařilo vyvinout orientovanou texturu (zvanou kubickou), kde krystaly jsou orientovány tak, že materiál má dva směry snadné magnetizace, které jsou na sebe kolmé. Jejich orientace krystalů je dána indexy (100) $[001]$. Jedna ze stěn krychle leží v rovině válcování, přičemž zároveň směr jedné ze tří hran této krychle se kryje se směrem válcování. Směr druhé hrany krychle (směr příčný), kolmý ke směru válcování, leží rovněž v rovině válcování. Magnetické vlastnosti jsou proto ve srovnání s Gossovou texturou značně lepší (nižší ztráty, vyšší permeabilita atd.) a plechy s touto texturou jsou tedy dalším významným pokrokem.

Výsledkem je minimální anizotropie magnetických vlastností, což je výhodné pro točivé stroje. Vlastní výroba je však spojena s neobyčejnými a těžko zvládnutými technologickými problémy a je ve stádiu vývoje. Rozdíl mezi Gossovou texturou (110) $[001]$ a kubickou texturou (100) $[001]$ ukazuje obr. 12. [4], [5]



Obr. 12 - a) Gossova textura (110) $[001]$, b) kubická textura (100) $[001]$

5.2.2.3 *Elektrotechnické plechy Eo*

V dnešní době jsou tabulové plechy pro stavbu transformátorů nahrazovány kontinuálně vyráběnými svitky pásu Eo válcovanými za studena. Svitky pásu Eo jsou nejpoužívanější materiál k výrobě transformátorů díky svým nízkým ztrátám. Technologickým zpracováním dochází k orientaci krystalů a tím k magnetické struktuře. Hrana krychle je snadným směrem magnetování a oproti tomu směr plošné úhlopříčky je nesnadný. Po tomto válcování za studena, které je pro Eo plechy charakteristické, následuje tepelné zpracování pásů v průběžných pecích v ochranné atmosféře, kde dochází k oduhličení a rekrystalizaci.

Pásky jsou kontinuálně oboustranně opatřovány izolační vrstvou Kerizol o tloušťce 2 μm až 5 μm , která zabraňuje jednak vzájemnému sváření závitů svitků při tepelném zpracování, jednak vzájemně elektricky izoluje plechy v magnetickém obvodu pro zmenšení ztrát vířivými proudy. Průběžné je rovněž měření mechanických a magnetických vlastností. Pásky mají hladký povrch, rovnoměrné magnetické i mechanické vlastnosti. Pásky tepelně zpracované jsou ke spotřebiteli dodávány ve svitcích o průměru do 920 mm, o šíři 500 mm až 970 mm a hmotnosti do 2 t. V plechách o šíři 500 mm až 950 mm a délce 1 500 mm a 2 000 mm a váze až 2,5 t. Výšky z těchto plechů se již obvykle dále tepelně nezpracovávají. Pokud je to nutné doporučuje se regenerační tepelné zpracování při teplotě 820 °C po dobu dvou hodin v ochranné nebo normální atmosféře podle druhu izolace. V zahraničí se tyto elektrotechnické plechy Eo označují jako plechy se strukturou GOSS (Grain Oriented Silicon Steel).

Plech Eo se vyrábějí v kvalitě Eo 9, Eo 10, Eo 11, Eo 12, Eo 13, Eo 15, Eo 17 a v tloušťkách 0,27 mm až 0,35 mm s tolerancí $\pm 20\%$. Nejpoužívanější jsou Eo 10 a Eo 11. Čísla znamenají ztrátové číslo $p_{1,5}$, vyjádřené v desetinách W/kg. Vyrábí se také plech o tloušťce 0,5 mm. V zahraničí se vyrábějí v tloušťkách 0,32 mm; 0,30 mm; 0,27 mm; 0,12 mm; 0,08 mm; 0,05 mm; 0,025 mm. Plechy Eo jsou vhodné pro výrobu výseků EI.

Aby se dosáhlo nízkých ztrát, musí se indukční tok uzavírat ve směru válcování. Pokud tomu tak je, dosahují tyto plechy indukci blízkou nasycení při nižších polích než plechy Et. Díky těmto vlastnostem mají široké uplatnění, ačkoliv jejich cena na 1 kg je oproti ceně plechů Et několikanásobně vyšší. Navzdory tomu pro menší ztráty v magnetickém obvodu a snadněji dosahované vyšší hodnoty indukce, umožňují zmenšení magnetických obvodů, takže při rozboru celkových nákladů se dosahovalo úspor několika tisíc Kč na 1 t plechů. Jejich magnetovací charakteristiky jsou v tab. 4 porovnány s vlastnostmi plechů Et 1,3.

Tab. 4 - Vlastnosti plechu Eo v porovnání s vlastnostmi plechu Et 1,3

H [A/cm] (amplituda)	B [T]						
	Eo 10 0,30mm	Eo 11 0,30mm	Eo 12 0,35mm	Eo 13 0,35mm	Eo 15 0,35mm	Eo 17 0,35mm	Et 1,3 0,35mm
0,3	1,2	1,12	1,1	0,97	0,84	0,74	0,05
1	1,6	1,56	1,52	1,48	1,41	1,35	6,6
5	1,74	1,70	1,64	1,70	1,65	1,60	0,8
10	1,8	1,76	1,76	1,74	1,72	1,67	1,2
25	1,88	1,84	1,80	1,85	1,82	1,77	1,51
100	1,98	1,96	1,94	1,98	1,96	1,94	1,82
P _{0,5}	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,20	0,38
P _{1,0}	0,49	0,52	0,56	0,59	0,64	0,70	1,3
P _{1,5}	1,02	1,12	1,23	1,35	1,48	1,62	3,2
P _{1,7}	1,65	1,75	1,90	1,93	2,16	2,36	4,2
(při cca 0,5A/cm) μ_{\max}	50000	40000	30000	25000	22000	20000	4000

Činitel plnění plechů Eo při tlaku 40 N až 50 N na cm² je 97 % až 96 %. Činitel stárnutí se zjišťuje ze změny p_{1,5} u plechů ohřátých po dobu 120 hodin na 120 °C a je menší než 3 %. Počet ohybů podél směru válcování má být větší než 3.

Izolační odpor zjištěný při tlaku do 100 N/cm² je větší než 20 Ω/cm². Při větším tlaku se izolace porušuje. Pokud by došlo k poruše izolace, nepříznivě by to ovlivnilo i magnetovací charakteristiku. Přímě v jádrech transformátorů by tento tlak neměl být větší než 40 N/cm² až 50 N/cm². Další vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5. [8]

Tab. 5 - Magnetické vlastnosti plechů a pásů pro elektrotechniku válcovaných za studena s magnetickou texturou pro tloušťky 0,27 mm; 0,30 mm a 0,35 mm

Jakost VP 42 0231	Tl. [mm]	P _{1,5}	P _{1,7}	Minimální indukce [T] při amplitudě int. mag. pole [A/m]				Značka výrobce	AISl	DIN 46400/3	EN 10107
				B ₁₀₀	B ₁₀₀₀	B ₂₅₀₀	B ₁₀₀₀₀				
Eo 089-27-N	0,27	0,89	1,30		1,82			Eo 9	M-4	VM 89-27N	M 089-27N
Eo 085-30-N	0,30	0,85	1,40		1,84			Eo 9			
Eo 092-30-N		0,92	1,30	1,60	1,80	1,90	1,98	Eo 10	M-4		
Eo 097-30-N		0,97	1,45	1,60	1,77	1,85	1,98	Eo 10	M-5	VM 97-30N	M 097-30N
Eo 107-30-N		1,07	1,50	1,56	1,77	1,80	1,96	Eo 11			
Eo 101-35-N	0,35	1,01	1,60	1,52	1,80	1,88	1,98	Eo 11	M-5		
Eo 111-35-N		1,11	1,58	1,52	1,70	1,84	1,96	Eo 11	M-6	VM 111-35N	M 111-35N
Eo 120-35-N		1,20	1,65	1,52	1,70	1,80	1,94	Eo 12			
Eo 130-35-N		1,30	1,75	1,48	1,67	1,80	1,92	Eo 13			
Eo 150-35-N		1,50	1,90	1,41	1,62	1,76	1,90	Eo 15			

5.3 Vlastnosti plechů a pásů pro elektrotechniku

Magnetické i mechanické vlastnosti typu Et byly odlišné od současně vyráběných typů (Eo a Ei). Nicméně všechny tři typy mají jedno společné, a to důležitost magnetických vlastností:

- měrné magnetické ztráty,
- magnetická polarizace (indukce),
- permeabilita.

Díky odlišné výrobě i technologii zpracování mají plechy Eo a Ei propracovanější magnetické vlastnosti. Současné požadavky zvyšují nároky na magnetické a mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v tab. 6. [8], [9]

Tab. 6 - Magnetické a mechanické vlastnosti elektrotechnických materiálů

Magnetické vlastnosti	Mechanicko-technologické vlastnosti	Geometrické vlastnosti	Další materiálové vlastnosti
celkové magnetické ztráty	razitelnost	tloušťka	izolační odpor
permeabilita	pevnost v tahu	činitel zaplnění	elektrická vodivost
magnetická polarizace	mez kluzu	rovinnost	tepelná vodivost
	tvrdost, tažnost	šířka	chemické složení

Magnetické vlastnosti EAS (elektrotechnické anizotropní oceli) jsou obvykle prezentovány při hodnotách B_{800} a $P_{1,7/50}$ (o magnetické indukci 1,7 T a intenzitě magnetického pole 800 A/m při 50 Hz). Vysoké magnetické vlastnosti EAS jsou založeny na dokonalé krystalografické textury oceli $\{110\} \langle 001 \rangle$ (krychle na hraně, Gossova textura). Za účelem dosažení nejlepších magnetických vlastností je důležité, aby osa $\langle 001 \rangle$, tj. osa snadné magnetizace, směřovala přesně podél směru válcování. Magnetické vlastnosti silně závisí na tloušťce oceli, velikosti zrna, specifickém elektrickém odporu, povrchovém nátěru, čistotě oceli.




5.4 Technologie výroby plechů a pásů pro elektrotechniku

V současné době existuje několik hlavních technologických variant výroby elektrické anizotropní oceli:

- sulfidická varianta (varianta "Armco", USA),
- sulfidicko-seleniová varianta (varianta "Kawasaki", Japonsko),
- sulfidicko-nitridická varianta (varianta "Nippon Steel", Japonsko),
- nitridicko-měďná varianta (varianta byla vyvinuta v Rusku v Novo-Lipetsku).

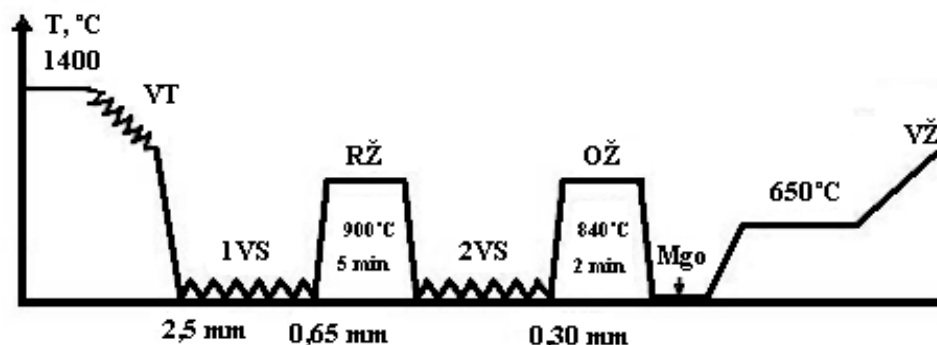
Tyto varianty se liší především použitým inhibičním systémem. Z toho pak vyplývají další odlišnosti, jako jsou parametry válcování za tepla a velikost deformace při válcování za studena. Typické chemické složení hlavních variant EAS jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 - Typické chemické složení oceli (po tavení), magnetické vlastnosti (pro tloušťku 0,33 mm) a mikrostruktury elektrických anizotropních ocelí hlavních variant výroby

Variant (inhibitory phase HP)	Concentration of elements, wt%							P _{1.7/50} , W/kg	B ₈₀₀ , T	Microstructure of EAS (x1)
	C	Si	Mn	S	Al	N	Cu			
Armco: sulphide (MnS)	0.02-0.03	2.9-3.2	0.065- 0.075	0.020- 0.028	<0.005	<0.005	<0.2	1.22-1.34	1.81-1.84	
NPS: sulphide- nitride (MnS and AlN)	0.045- 0.060	2.9-3.2	0.06-0.09	0.020- 0.028	0.025- 0.032	0.007- 0.013	<0.2	1.00-1.12	1.90-1.93	
NLMP: nitride- copper (AlN)	0.025- 0.040	2.9-3.2	0.1-0.3	<0.015	0.011- 0.017	0.008- 0.013	0.4-0.6	1.16-1.28	1.86-1.90	

5.4.1 Sulfidická varianta (varianta "Armco", USA)

V současné době je tato varianta výroby oceli nejrozšířenější. Inhibiční fáze této oceli je MnS. Hlavní technologické operace při sulfidické výrobě jsou: tavení (s povinným omezením koncentrace manganu), vysokoteplotní žhání, válcování za tepla, dvě studené válcování oddělené rekrytalizačním žháním, oduhličení žháním a vysokoteplotní žhání. Finální ocel má magnetickou indukci 1,81 T až 1,84 T v magnetickém poli 800 A/m. Při válcování je zásadně důležitá tvorba vrstvy polygonizovaných krystalů s velmi výraznou deformací struktury {110} <001> v podpovrchových vrstvách. Přítomnost této vrstvy dosáhneme díky dvojímu studenému válcování s deformací 40 % - 60 %, oddělených rekrytalizačním žháním. Docílí se poměrně velkého počtu zrn s dokonalou orientací {110} <001> v ocelové konstrukci. Část těchto krystalů jsou jádra pro sekundární rekrytalizaci.



Obr. 13 - Technologický postup sulfidické varianty

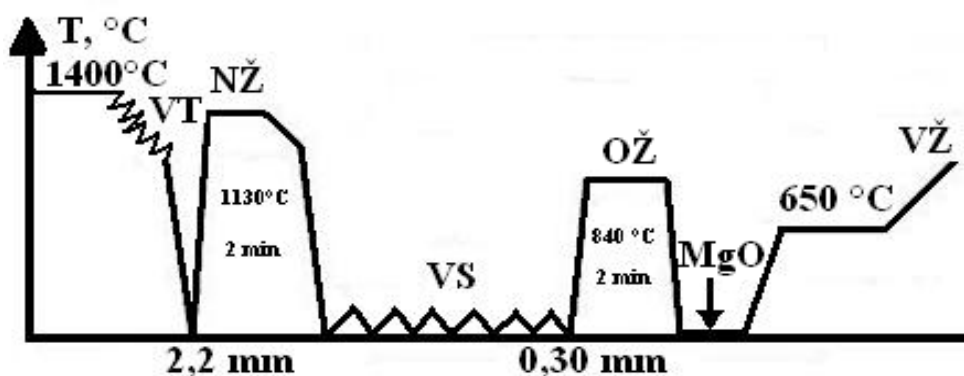
VT - válcování za tepla, VS - válcování za studena, RŽ - rekrytalizace žháním, OŽ - oduhličení žháním, VŽ - vysokoteplotní žháním

5.4.2 Sulfidicko-seleniová varianta (varianta "Kawasaki", Japonsko)

Varianta "Kawasaki" (inhibiční fáze MnS, MnSe a Sb) je vývoj varianty sulfidické. Při této variantě výroby, prochází ocel stejnými úkony a ve stejném pořadí jako v technologii "Armco". Existuje však několik zásadních rozdílů: selen a antimon jsou zavedeny do oceli při tavení, teplota pásu se snižuje před válcováním za tepla, režim válcování je pevněji omezen, hodnota deformace vzrostla v průběhu druhého válcování za studena (více než 60 %), vysokoteplotní žháním zahrnuje izotermický podíl kovu v rozmezí teplot sekundární rekrytalizace. Finální ocel má v magnetickém poli 800 A/m magnetickou indukci 1,87 T a vyšší. A je charakterizována vysokou kvalitou elektrické izolační vrstvy. Nicméně vzhledem k velmi přísným požadavkům na parametry technologických operací se tato varianta výroby elektrické anizotropní oceli nemůže stát prakticky rozšířenější.

5.4.3 Sulfidicko-nitridická varianta (varianta "Nippon Steel", Japonsko),

V sulfidicko-nitridické variantě výroby oceli jsou inhibiční fáze AlN a MnS. Ocel na tavení se vyznačuje zvýšeným (v porovnání k sulfidické variantě) obsahem C a Al. Hlavní operace jsou: válcování za tepla, normalizační žháním, jedno válcování za studena, oduhličování žháním a vysokoteplotní žháním. Magnetická indukce v magnetickém poli 800 A/m činí 1,89 T–1,94 T a je u této varianty nejvyšší. Dosáhne se jí díky vytvoření velkého množství jemně rozptýlené inhibiční fáze během tepelné úpravy a mocné síly dopadu při jediném válcování za studena (hodnota deformace je více než 80 %). Přítomnost vysokoteplotního žháním (1120 °C – 1150 °C) s přísně regulovaným principem chlazení je zásadně důležitá v této technologii. Je třeba poznamenat, že proces výroby oceli v souladu s těmito předpisy, není vždy možný, vzhledem k nedostatku potřebného vybavení.



Obr. 14 - Technologický postup sulfidicko-nitridické varianty

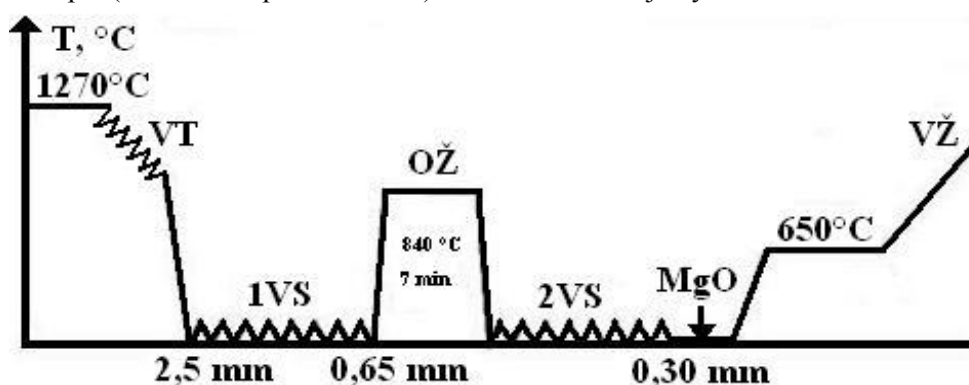
VT - válcování za tepla, NŽ - normalizační žhání, VS - válcování za studena, OŽ - oduhličení žháním, VŽ - vysokoteplotní žhání

5.4.4 Nitridicko-měďná varianta (varianta vyvinuta v Rusku v Novo-Lipetsku)

Nitridicko-měďná varianta výroby elektrické oceli byla vyvinuta v Rusku (SSSR) v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století, předními specialisty Novo-Lipetského metalurgického závodu. Později tuto technologii vylepšili společně s odborníky z Magnitogorské hutě a Verkh-Isetského hutního závodu.

Ocel má zvýšený obsah uhlíku, dusíku a mědi ve srovnání s variantou sulfidické a vyznačuje se nižším obsahem hliníku, ve srovnání sulfidicko-nitridické varianty. Inhibiční fáze je AlN. Hlavní operace jsou: válcování za tepla, dvě studené válcování oddělené oduhličením a vysokoteplotní žhání. Magnetická indukce v oblasti 800 A/m je 1,86 T – 1,90 T.

Významný rozdíl mezi nitridicko-měďnou variantou a sulfidickou variantou je nižší teplota válcování za tepla (~ 1270 °C oproti 1400 °C). Důsledkem toho je vyšší obsah uhlíku v oceli.



Obr. 15 - Technologický postup nitridicko-měďné varianty výroby

VT - válcování za tepla, VS - válcování za studena, OŽ - oduhličení žháním, VŽ - vysokoteplotní žhání

5.5 Specifikace kritických vlastností a parametrů nízkoztrátových plechů

Pro zvyšující se nároky a požadavky na nízkoztrátové plechy a pásy se také zvyšují kritické vlastnosti a parametry. Záměrem je dosažení úzkých tolerancí tloušťek plechů a pásů, dále rovnoměrnost tloušťek v různých jeho místech pro dosažení co největšího plnění magnetického obvodu a co nejdelší stálost magnetických vlastností.

Kritickými se stávají magnetické vlastnosti u strojů velkých výkonů, u kterých se nepříznivě zmenšuje poměr jejich povrchu k jejich objemu a zhoršuje se tím jejich chlazení. Přípustné oteplení se stává jednou z rozhodujících podmínek omezující jejich výkon. Magnetické vlastnosti elektrotechnických plechů a pásů pro výrobu strojů a transformátorů malých výkonů nejsou tak kritické. [8]

5.5.1 Požadované vlastnosti nízkoztrátových pásů

U elektrotechnických nízkoztrátových pásů požadujeme co nejmenší ztráty energie při transformaci. Toho lze nejlépe dosáhnout u orientovaného pásu tzv. Gossovou texturou (110) [001] („krychle na hraně“), jak již bylo zmíněno v textu. Zárodky této textury vznikají již při válcování za tepla. K úplnému rozvinutí dochází až při vysokoteplotním žíhání, pokud primární matrice splňuje následující podmínky:

- primární matrice je jemnozrnná (10 μm – 20 μm),
- materiál obsahuje účinný inhibiční systém (většinou precipitáty MnS a/nebo AlN, které dosahují velikosti cca 5 nm – 50 nm a hustoty 10¹³ cm⁻³ – 10¹⁴ cm⁻³ [podle Lobanova]), který brání normálnímu růstu zrn,
- primární matrice musí mít určitou strukturu a texturu (musí obsahovat zrna s texturou (111) [112] a zrna s orientací (110) [001]),
- chemické složení vylučuje transformaci $\alpha - \gamma$ (obsah uhlíku musí být menší než 0,005 %).

V průběhu vysokoteplotního žíhání brzdí inhibitory normální růst zrna, teprve až při vyšších teplotách (cca 860 °C) dochází k rozpouštění a koagulaci inhibitorů. Zrna Gossovy textury mají určitou energetickou výhodu oproti zrnům s válcovací texturou, které je obklopují. Dochází k jejich prudkému růstu (anomální růst zrna, sekundární rekrytalizace). Jednotlivá Gossova zrna prorostou celou tloušťkou pásu, jejich růst se tedy zastaví až se jednotlivá Gossova zrna navzájem setkají. [9]

5.5.2 Možnosti ovlivnění kvality nízkoztrátových plechů a pásů

Obsahem Si a Al

S rostoucím obsahem Si a Al (které na sebe vážou kyslík a dusík) roste měrný odpor oceli, proto klesají měrné ztráty. Naopak hodnota indukce nasycení klesá.

Čistota oceli

Proces přemagnetování zpomalují nečistoty v oceli (oxidy, nitridy, sulfidy, karbidy, ...).

Proto nečistoty snižují indukci v nízkých polích a zvyšují měrné ztráty.

Struktura a textura nízkoztrátových pásů

Struktura a textura mají významný vliv na finální vlastnosti.

Tloušťka

Čím tenčí jsou válcované plechy, tím menší jsou měrné ztráty.

Velikost finálního zrna

Velikost zrna u orientovaného pásu je v rozmezí 5 mm – 20 mm, u neorientovaného cca 100 μm .

Dokonalost orientace

Rozsah orientace u klasických pásu je rozptýl do 9° , pásy s vysokou indukcí (HiB) do 3° .

Vnitřní pnutí

Měrné ztráty stejně jako nečistoty v oceli působí také vnitřní pnutí.

6 Standardní měření nízkoztrátového pásu

V rámci zadání diplomové práce jsem navštívil válcovny plechu ve Frýdku-Místku. Seznámil jsem se zde s výrobou plechů a také se způsobem měření.

Standardní měření se provádí na vzorcích odebraných na začátku a konci každého distribučního pásu (tj. pásu, který je připraven k prodeji zákazníkovi). Odeberou se tabule plechu, které se nastříhají na potřebné rozměry a ve zkušebnách se provede příslušné měření.

Postupně se přechází na měření na tabulových vzorcích (EN 10280). V tomto podniku nejsou ještě na tento způsob vybaveni.

Mezi standardní měření patří:

1. Měření magnetických vlastností.
2. Měření geometrických tvarů.
3. Měření povrchového izolačního odporu.

6.1 Měření magnetických vlastností

Magnetické vlastnosti jsou měřeny pomocí Epsteinova rámce (ČSN EN 60404-2) – takto změřené vlastnosti akceptují všichni zákazníci. Konstrukce Epsteinova rámce je definována vyhláškou 71/2004 Sb. (Vyhláška, kterou se stanoví požadavky na měřicí sestavy s Epsteinovým přístrojem pro měření magnetických vlastností plechů pro elektrotechniku). Na základě změřených hodnot polarizace J_{800} a měrných ztrát $p_{1,5}$ a $p_{1,7}$ (viz ČSN EN 10107) se určí jakost materiálu. Této jakosti by měl vyhovovat celý distribuční pás, proto se bere horší z obou hodnot naměřených na jeho začátku a konci. Podle této jakosti se prodává (i když zákazníci mohou mít specifické požadavky). V tab. 8 je seznam konvenčních jakostí dle ČSN EN 10107 (jsou i jakosti s vysokou permeabilitou, případně po laserovém zpracování).

Tab. 8 - Seznam konvenčních jakostí dle ČSN EN 10107

Jakost	p _{1,5}	p _{1,7}	J ₈₀₀	Minimální činitel zaplnění
	[W/kg]	[W/kg]	[T]	
M110-23S	0,73	1,10	1,78	0,945
M120-23S	0,77	1,20	1,78	0,945
M127-23S	0,8	1,27	1,75	0,945
M120-27S	0,80	1,20	1,78	0,950
M130-27S	0,85	1,30	1,78	0,950
M140-27S	0,89	1,40	1,75	0,950
M130-30S	0,85	1,30	1,78	0,955
M140-30S	0,92	1,40	1,78	0,955
M150-30S	0,97	1,50	1,75	0,955
M140-35S	1,00	1,40	1,78	0,960
M150-35S	1,05	1,50	1,78	0,960
M165-35S	1,11	1,65	1,75	0,960

Po mnoho let byla běžná praxe uvádět hodnoty magnetické indukce. Ve skutečnosti se Epsteinovým rámcem měří magnetická polarizace (magnetické sycení), které je definované jako:

$$J = B - \mu_0 \cdot H \quad (14)$$

J magnetická polarizace,

B magnetická indukce,

μ_0 magnetická konstanta,

H intenzita magnetického pole.

Poznámka: Rozdíl mezi B a J při 800 A/m činí až 0,001 T.

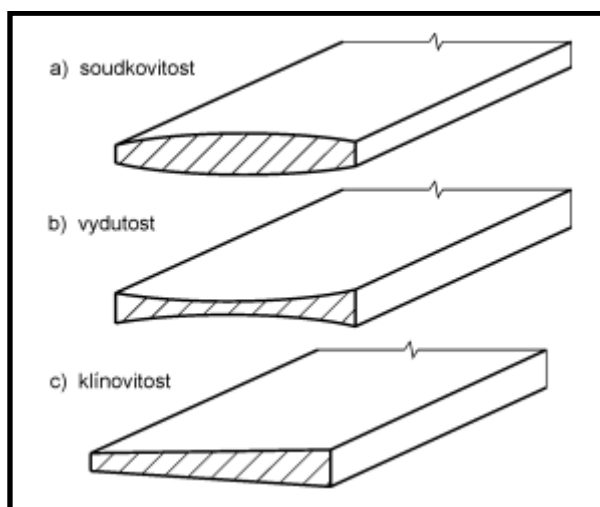
Při měření magnetických vlastností pomocí Epsteinova rámce je tloušťka vypočítávána z váhy (vychází se ze smluvní hustoty 7650 kg/m³ a rozměrů vzorků).

6.2 Měření geometrických tvarů

Mezi standardní měření patří rozměrové úchytky, přesněji podle normy ČSN EN 10107, měří se podle ČSN EN 10251. Obvykle jsou rozměry a povolené úchytky definovány přímo zákazníkem a pečlivě se dodržují (tj. musí se měřit):

- tloušťka a mezní úchytky tloušťky,
- šířka a mezní úchytky šířky pásu,
- délka (v případě dodávání v tabulích – málo obvyklé),
- šavovitost (hrana pásu se na délce 1,5 m nesmí odchýlit o více než 0,5 mm od ideální přímky),
- rovinnost (vlnitost) – tabule při položení na rovnou podložku nesmí tvořit vlnu – horní omezení je 1,5 %.

Za další nedokonalosti elektrotechnického příčného profilu pásu můžeme považovat vypouklost (soudkovitost), vydutost a klínovitost, které vidíme na obr. 16.

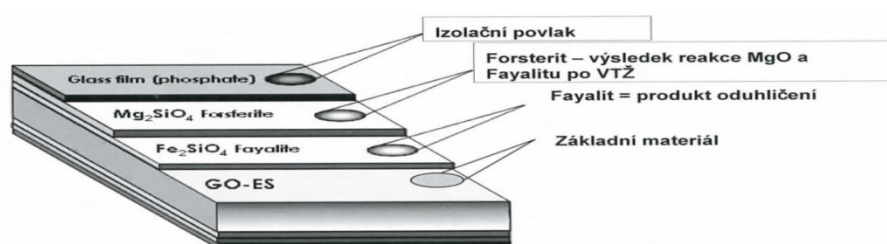


Obr. 16 - Nedokonalosti elektrotechnického příčného profilu pásu

V praxi se ale objevuje mnoho dalších typů nedokonalostí, ke kterým přistupují i ty, jež jsou způsobeny např. opotřebením či poškozením pracovních válců válcovací stolice. V každém případě je z hlediska zajištění kvality výroby i z důvodů optimálního využití pracovních válců, nutno sledovat příčný profil pásu. [10]

6.3 Měření povrchového izolačního odporu

Měření povrchového izolačního odporu se provádí podle EN 10282, hodnoty nejsou normovány, každý zákazník má vlastní požadavky. Nejběžnější je dnes hodnota $> 20 \Omega/\text{cm}^2$, kterou opět musí splnit oba odebrané vzorky na obou površích, tj. horní i dolní strana. Tloušťka izolační vrstvy je $2 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$, musí mít dobrou přilnavost a nesmí se rozpouštět v transformátorovém oleji.



Obr. 17 - Náčes jednotlivých vrstev nizkoztrátového pásu

7 Metody a metodika kontroly kritických parametrů

7.1 Metody měření magnetických vlastností

7.1.1 Měřicí přístroj magnetických vlastností MPG

V oblasti testování elektrotechnických materiálů je předním výrobcem měřicích přístrojů firma BROCKHAUS-MESSTECHNIK. Pro měření magneticky měkkých materiálů vyrábí měřicí přístroj MPG.

Funkce měřicího přístroje:

- měřicí přístroj MPG slouží k stanovení magnetických vlastností elektrických plechů a jiných měkkých magnetických materiálů,
- volně konfigurovatelný přes specifické měřicí cívkové systémy,
- plně digitalizované evidování dat,
- současné připojení až 12 cívkových systémů,
- měřicí cívkové systémy a vyhodnocení podle ICE 60404-ff., ISO ASTM pro měření s „Epsteinovým rámcem“,
- velmi rychlá doba měření,
- vysoká přesnost nastavení přístroje, velmi přesné měření a vysoká reprodukovatelnost.

Určení polarizace:

Určení polarizace se uskutečňuje přes měření indukovaného napětí, přepočet a integraci. Paralelní začlenění veličin H a J přes oddělený analogový-digitální měnič garantuje zcela současné měření. Procesorový systém měřicího přístroje MPG vypočítá z diferencovaných a integrovaných naměřených veličin všechny uvedené hodnoty.

Měření se provádí pomocí sinusové polarizace. Pomocí řídicího algoritmu je sekundární napětí kontrolováno a neustále podle cílové hodnoty regulováno. Povinné napětí je vyráběno přes vysoce stabilní, digitální frekvenční generátor. Amplituda a frekvence je nastavena softwarem podle zadaných dat.

Měřicí cívkové systémy:

- Epsteinův rámec pro frekvenci od 50 Hz/60 Hz podle IEC 60404-2,
- Epsteinův rámec pro frekvenci do 400 Hz podle IEC 60404-2,
- Epsteinův rámec pro frekvenci přes 400 Hz,
- Modul pro kroužky, statory a transformátorová jádra,
- apod. [17]

Tab. 9 - Technická data

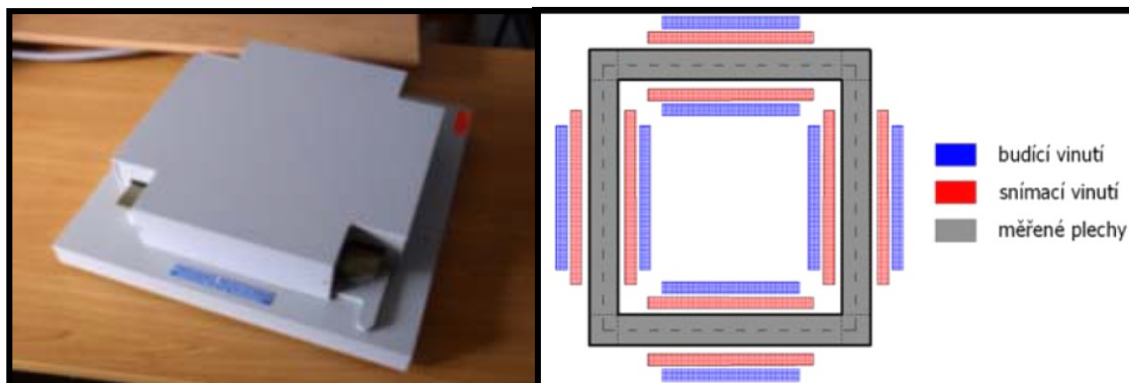
Přesnost opakování – 0,1 %
Srovnatelnost výsledků měření – podle IEC 60404 a nasl.
Nastavení přesnosti povinné hodnoty – podle IEC 60404 a nasl.
Maximální proud ± 40 A
Maximální napětí ± 100 V
Připojení cívky – až 12 cívek paralelně
Způsob provozu – PC/Software
Provedení přístrojů – stolní nebo skříňová verze
Měření frekvence – 3 Hz až 10 kHz (volitelně DC, 10 kHz až ke 100 kHz (± 10 A / 50 V))
Polarizace – 1 mT až max. 2 T (v krocích od 0,001 T)
Přesnost nastavení – 0,1 %
Zásobení proudem – 3 x 400 V AC, neutrální, PE



Obr. 18 - Měřicí přístroj magnetických vlastností MPG

7.1.1.1 Epsteinův rámec

Epsteinův rámec slouží ke zjišťování magnetických vlastností plechů pro elektrotechniku za podmínek definovaných normou číslo ČSN 345871. Epsteinův přístroj je na obr. 19. [15], [9]



Obr. 19 - Epsteinův přístroj a jeho uspořádání

Magnetické vlastnosti plechů pro elektrotechniku se pomocí tohoto nástavce a dané normy stanovují při intenzitě magnetického pole 0,2 A/m až 10 000 A/m a amplitudě intenzity magnetického pole 0,2 A/m až 30 000 A/m. Ztráty magnetického materiálu se mohou měřit u neorientovaných materiálů do amplitudy magnetické indukce 1,6 T a u orientovaných materiálů do 1,8 T. [2], [15]

Tab. 10 - Technická data Epsteinova rámce

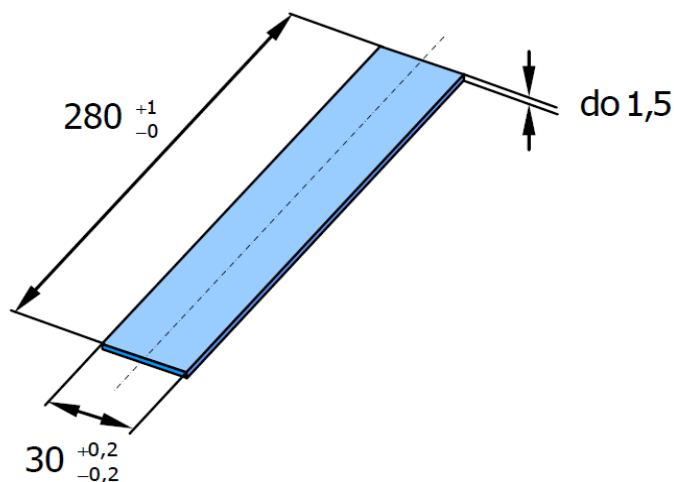
Malý Epsteinův rámec:	1 kg
Model:	25 cm
Počet závitů:	700/700

Tab. 11 - Doporučené rozsahy výrobce

Frekvence:	DC pole , AC pole 1 Hz – 150 Hz (základní), ostatní volitelné
Intenzita pole:	1 - 30 000 A/m
Polarizace:	0,001 – 2 T

Tab. 12 - Rozměry jednotlivých vzorků, ze kterých se skládá magnetické jádro

Délka:	280 mm
Šířka:	30 mm
Tloušťka:	do 1,5 mm

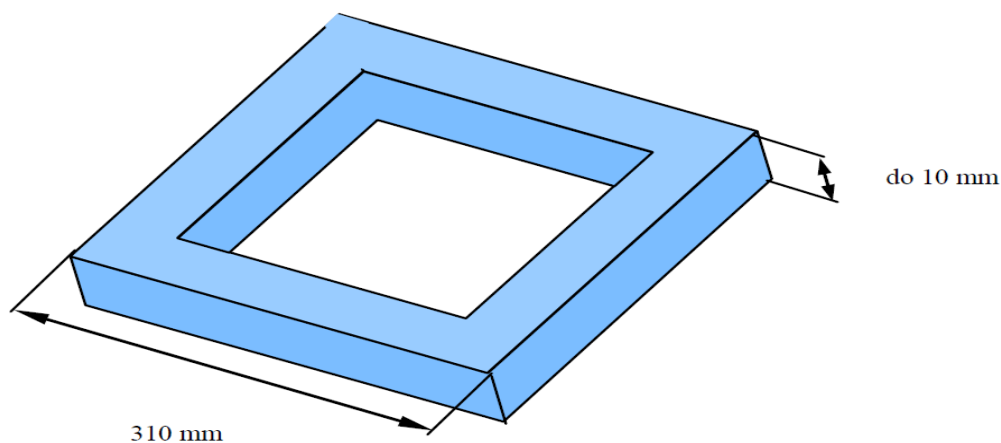


Obr. 20 - Vzorek pro měření magnetických vlastností

Další požadavky jsou:

- počet plechů dělitelný 4 (minimálně 12 ks),
- pásy použité k měření nesmí mít otřepy, nerovné okraje a jiné defekty.

Jednotlivé plechy těchto rozměrů a potřebného množství se následně postupně vkládají do Epsteinova rámce podle předpisu daného normou a vytvoří se tak výsledný magnetický obvod, na kterém jsou stanovovány magnetické vlastnosti, obr. 21. [2], [15]



Obr. 21 - Epsteinův rámec

Podstatou měření Epsteinovým rámcem je přímé měření činných ztrát wattmetrem. Epsteinův rámec není žádný elektrický měřicí přístroj, ale jen definované uspořádání magnetického obvodu složeného z přesně dané hmotnosti plechů ve tvaru pásků určených rozměrů. Součástí přístroje jsou 4 válcové cívky, do nichž se zasunou sloupky vytvořené z plechových pásků. Ty se srazí těsně

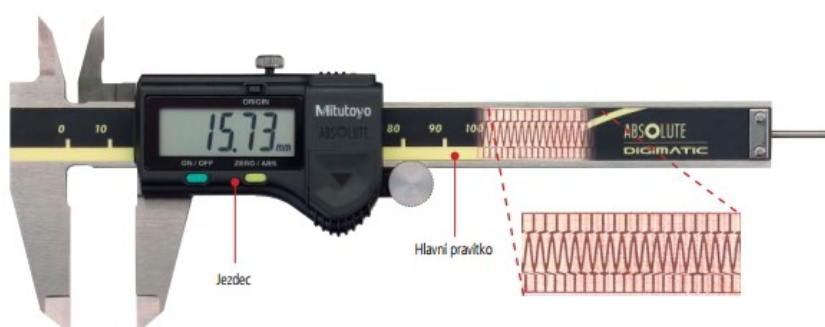
k sobě, čímž vznikne magnetický obvod ve tvaru čtvercového rámu. Každá z cívek má pro toto měření dvě oddělená vinutí. Odpovídající části vinutí všech čtyř cívek se po sestavení magnetického obvodu zapojí do série. Tak vznikne obvod magnetizační (můžeme ho považovat za primární) a obvod měřicí (sekundární). Po zapojení wattmetru, dvou voltmetrů a ampérmetru vznikne pracoviště, na němž lze změřit magnetické ztráty přesně. Využívá se velkého množství plechů (10 kg pro tzv. velký Epstein a 1 kg pro malý Epstein). [16]

7.2 Metody měření geometrických tvarů

V současné době se tloušťka pásu nejčastěji měří na vystřižených vzorcích pomocí ručních mikrometrů v několika stanovených bodech, výsledné hodnoty jsou zapisovány většinou ručně do tabulky a následně graficky, případně i výpočtem zpracovány pro hodnocení tloušťky vzorku. Tato metoda umožňuje jen velmi hrubé vykreslení tloušťky pásu. Vlivem nepřesnosti měření a vlivem změny pracovníka provádějícího měření nelze zcela přesně porovnávat mezi sebou jednotlivé vzorky pro posouzení malých změn tloušťky pásu. Nezanedbatelnou nevýhodou je také velká pracnost prováděných měření. [10]

7.2.1 Měření šířky digitálním posuvným měřítkem

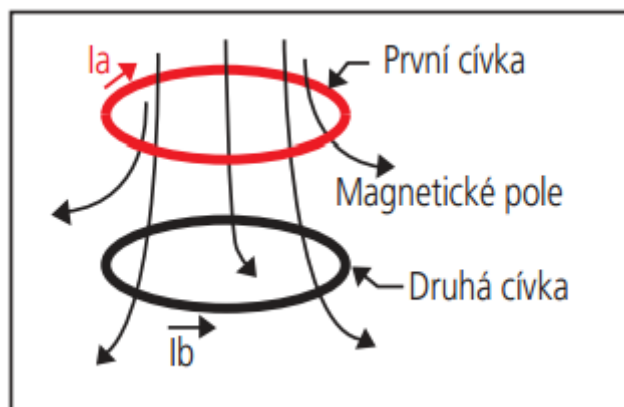
Při finálním dělení pro zákazníky se šířka měří digitálním posuvným měřítkem. Od analogových se liší tím, že nemají nonius a jejich pevná a posuvná část funguje jako magnetický, indukční nebo kapacitní snímač dráhy. Pohyblivá část je dále opatřena zdrojem el. energie a číslicovým displejem, který zobrazuje přímo naměřenou hodnotu. Pracuje se s nimi stejně jako s analogovými měřítky, oproti nimž mají zejména výhodu jednoduššího odečítání naměřených hodnot s přesností na dvě desetinná místa. [18]



Obr. 22 - Digitální posuvné měřítko

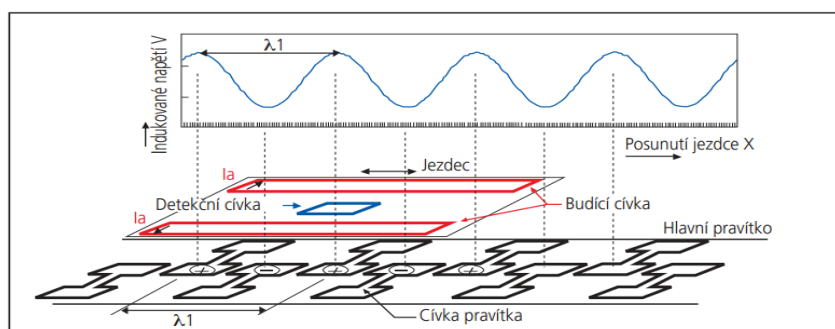
Základní princip elektromagnetického indukčního snímače:

Vysokofrekvenční proud procházející cívkou indukuje proud v blízkosti druhé cívky, a na této druhé cívkě se objeví napětí. Tento jev je známý jako elektromagnetická indukce. Důležitým faktem je, že síla indukovaného proudu v druhé cívkě, a tím i napětí na cívkě, závisí na magnetické permeabilitě prostoru mezi závity, která je téměř stejná pro vzduch, vodu i olej.



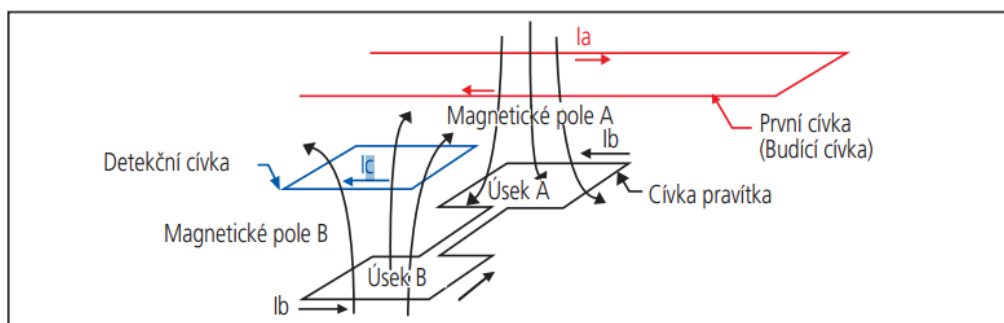
Obr. 23 - Elektromagnetická indukce

Systém přírůstkového měření délky, který je použit u snímačů elektromagnetického indukčního typu je uveden na obr. 24. Cívky pravítka, které tvoří základ pro přesné měření délek, jsou uspořádány v přesných intervalech (λ_1) na hlavním pravítku nástroje – posuvné měřítko.



Obr. 24 - Základní princip elektromagnetického indukčního snímače

Budící cívky a detekční cívky se nacházejí pod jezdce vedle pravítka. Jezdec je vybaven elektronickými obvody, které převádí napětí generované v detekční cívce na údaje měření délky. Jak vše funguje, ukazuje obr. 25.



Obr. 25 - Budící a detekční cívky v inkrementálním snímači

Magnetické pole **A** je generováno proudem I_a budicí cívku procházející. To indukuje proud I_b do úseku **B** na stupnici cívky. Tento indukovaný proud prochází úsekem **B** a vytváří magnetické pole **B**. To na druhé straně indukuje proud I_c v detekční cívce opačné cívky **B**. Síla pole se mění podle polohy cívky a detekční cívky jezdce, indukované napětí na detekční cívce se mění stejným způsobem. Jak je jezdec přesunut, indukované napětí se mění periodicky, jak je znázorněno na obr. 25 a může být určena pozice jezdce. [19]

7.2.2 Měřič tloušťky X-ray

Při použití X-ray měřiče tloušťky se skenovacím mechanismem v průběhu výroby je možno provádět jen orientační měření profilu pásu – v důsledku pohybujícího se pásu je měření prováděno napříč pásem šikmo, čímž je znehodnoceno podélnou změnou tloušťky. Měření není prováděno zcela od kraje ke kraji ani při zastaveném pásu, navíc není prováděno bodově, ale prozářením plochy o průměru několika cm. On-line měření pomocí vícebodových X-ray měřičů tloušťky, které mají v jedné měřicí hlavici více detektorů měří profil jen v omezeném počtu bodů a dávají tak opět jen orientační informaci o profilu pásu. [10]

Na linkách se měří i tloušťka povlaku, nicméně toto měření není ze své podstaty přesné (hodnoty kolem 2 μm se špatně měří, navíc přechod izolační vrstva – kov není rovná plocha, pod povrchovou vrstvou izolace se nacházejí podpovrchové oxidy). Měření tloušťky povlaku slouží pouze k orientační kontrole kvality nánosu, rozhodující je hodnota povrchového izolačního odporu.

7.2.3 Měření tloušťky digitálním mikrometrem

Při finálním dělení pro zákazníky se tloušťka měří digitálním mikrometrem. Druhů mikrometrických měřidel existuje velké množství. Jsou zhruba o 1 řád přesnější než posuvná měřítka s přesností 1 μm . Jejich princip je stejný jako u posuvných měřítek. Na obr. 26 je zobrazen digitální mikrometr.



Obr. 26 - Digitální mikrometr

7.2.4 Měření tloušťky pomocí měřiče MPP

Měřič tloušťky pásu MPP od firmy UVB TECHNIK je určen k laboratornímu, plně automatickému měření tloušťky vystřiženého vzorku pásu. Nová metoda plně automatického měření profilu pásu umožňuje velmi jednoduché vložení měřeného vzorku do svěrného úchyty měřicího zařízení, kde je uchycen a tím je při měření zaručena kolmost diferenciálně zapojených

dotykových snímačů tloušťky na plochu měřeného pásu. Měření je plně automatické – po zmáčknutí tlačítka najede měřicí hlavice na vzorek a přesune se po celé šířce pásu, přičemž vyhodnocovací jednotka načte v nastavené periodě vzorkování hodnoty tloušťky a vyhodnotí profil pásu. Měřič není nutné mechanicky nastavovat na nominální měřenou tloušťku ani na šířku pásu, po dojetí měřicí hlavice na konec vzorku je měření automaticky ukončeno a měřicí hlavice se vrátí do výchozí pozice. Měřená data jsou automaticky přenesena do vyhodnocovací jednotky na bázi osobního počítače, na obrazovce je zobrazen profil pásu s přesností na 1 μm . Data jsou automaticky vyhodnocena dle standardních vzorců hodnotících klínovitost a soudkovitost pásu, případně dle zákazníkem definovaných vzorců a kritérií. Je možno vytisknout protokol o měření v grafické i numerické formě, případně přenést data po síti do nadřazeného systému. Data jsou také archivována pro pozdější použití. [10]



Obr. 27 - Měřič profilu pásu MPP od firmy UVB TECHNIK

Tab. 13 - Základní technické údaje

Parametr	Hodnota
Rozlišení	0,001 mm
Tloušťka pásu vzorku	0,03 mm – 5 mm (10 mm)
Přesnost	$\pm 1 \mu\text{m}$
Maximální délka vzorku pásu MPP-3000	3000 mm

7.2.5 Měřicí rovný (kovový) stůl na měření rovinnosti, klínovitosti apod.

Pro měření rovinnosti, klínovitosti apod. je podstatný rovný (kovový) stůl, na který se položí odebraná tabule plechu, případně rozstřižená podélně pro stanovení vnitřních pnutí. Používají se klasická měřidla, výška vlny se měří klínkem s vyznačenou stupnicí výšky (0 mm – 5 mm).

7.3 Měření povrchového izolačního odporu pomocí Franklin testeru

Povrchový izolační odpor = Franklinův koeficient izolačního odporu se měří na "Franklin testeru". Ve válcovnách plechů ArcelorMittal Frýdek-Místek se používají dva typy Franklin testerů. První je starší od firmy Orb (model: GB) a druhý nový od firmy Brockhaus (model: FT 510).

Funkce měřícího Franklin Testeru FT 510:

- povrchový odpor,
- stanovení odolnosti povrchu jednotlivých vzorků elektrotechnické oceli,
- kontrola kvality izolovaného povlaku,
- ruční nebo plně automatické provedení,
- příprava a realizace měřícího procesu podle ASTM-Standard A717-81 a IEC 60404-11.

Tab. 14 - Technické data

Testovací napětí – 0,5 V, 1 mV rozlišení
Přesnost regulace – 0,5 %
Přesnost systému – 1 %
Systémové rozlišení – 1 mV (0,1 % na 1 V)
Měřicí přístroj pro hydraulický tlak – 0 bar až 25 bar ± 5 % (1290 N ± 5 %)
Testovací hlava – elektrický kontakt: 10 pinů, celková plocha: $6,45\text{cm}^2 \pm 1$ %
Maximální testovací tlak – 25 bar (zobrazená hodnota)
Hmotnost (manuální verze) – napájení asi 6 kg, zařízení a čerpadlo cca 70 kg
Napájecí napětí – 230 V AC, 50 Hz



Obr. 28 - Franklin tester od firmy Brockhaus [17]

7.4 Měření povrchových vad

Nejčastější použití těchto výrobků je ve válcovnách za studena při výrobě pásů a umožňují automaticky detekovat povrchové vady pásů pomocí CCD kamery a vyhodnocovací jednotky.

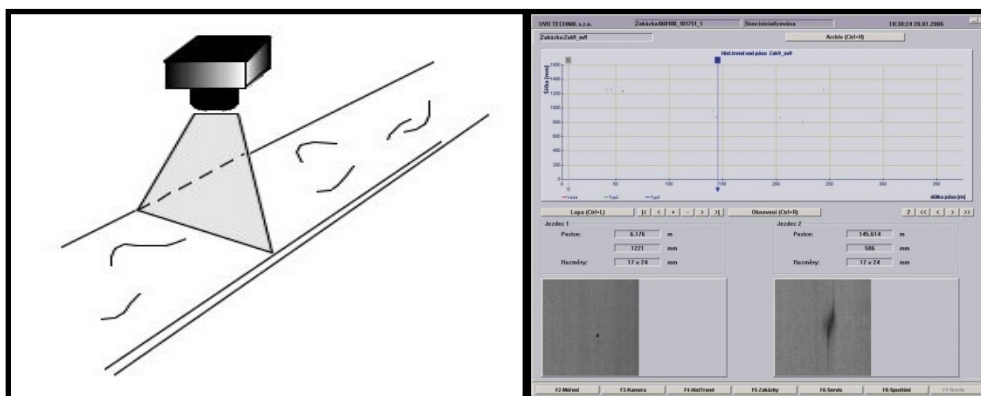
Princip zařízení:

Nad (pod) sledovaným osvětleným pásem je umístěna řádková CCD kamera, která snímá povrch pohybujícího se pásu a přenáší jeho obraz do vyhodnocovací jednotky. Vyhodnocovací jednotka, v níž v reálném čase probíhá vyhodnocování povrchu pásu, je jádrem celého zařízení. Lze ji připojit do podnikové sítě. Povrch pásu je možné průběžně sledovat na monitoru v komprimované podobě. Vyhodnocené povrchové vady jsou na monitoru barevně zvýrazněny a lze spínat výstupy pro ovládání technologie. Aktuálně vyhodnocené údaje o pásu se zapisují do souboru alarmů, je o nich informován operátor a eventuálně s nimi může být řízeno značkovací zařízení pro barevné značení vadných oblastí přímo na pás. Pro každý sledovaný pás je vytvořen protokol. Každý protokol pak můžeme prohlížet např. v programu Microsoft Excel.

Volitelně lze provádět klasifikaci defektů do tříd. Vlastní vyhodnocování se spouští v okamžiku, kdy se snímáný pás nachází pod CCD kamerou. Zařízení si samo sleduje polohu a šířku pásu. Uživatel může nastavit velikost levého a pravého okraje, na kterých se vyhodnocování vad neprovádí.

Výhody zařízení:

- vyšší zabezpečování jakosti výroby,
- možnost sledování a vyhodnocování povrchu pásu na nepřístupných místech a při rychlostech, kdy je kontrola lidským okem nespolehlivá,
- možnost měření šířky pásu. [20]



Obr. 29 - Měření povrchových vad

7.5 Technologické vlastnosti

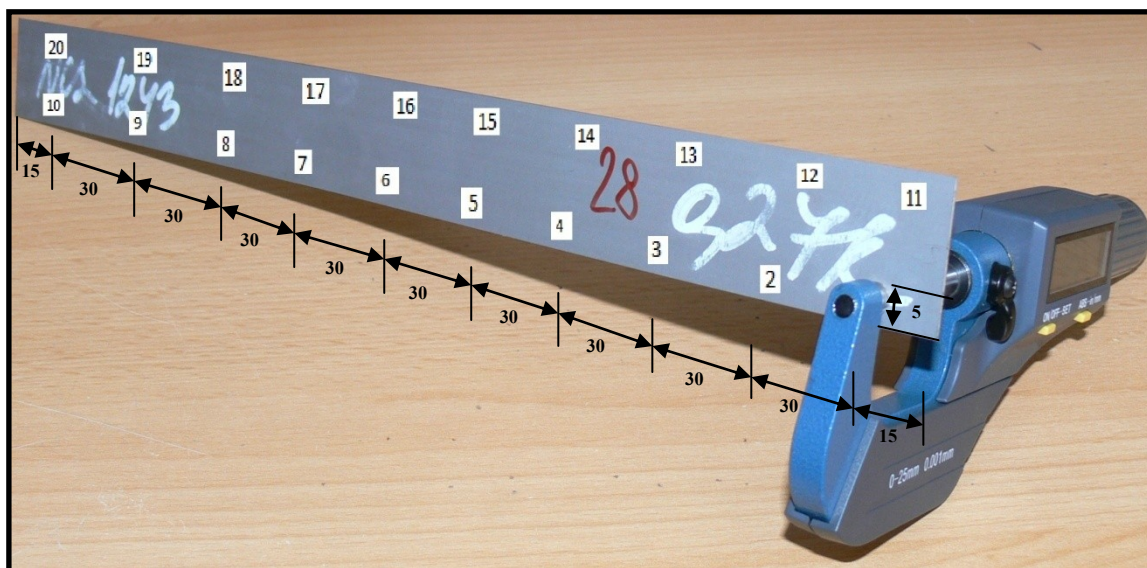
Dalšími parametry jsou technologické vlastnosti:

- hustota – vychází ze složení, pro měření magnetických vlastností se používá tzv. smluvní hustota 7650 kg/m^3 , skutečná hustota je k ní velmi blízko;
- činitel zaplnění – jeho hodnoty vyžaduje ČSN EN 10107, pro jmenovitou tloušťku 0,30 mm má být jeho hodnota $> 0,955$. Měří se občas, tato hodnota je při dnešním stavu povrchu pásů (kvalitě válcování) snadno dosažitelná;
- vnitřní pnutí – tabule při podélném rozstřížení by neměla vykazovat „rozevření“ podél stříhu (ČSN EN 10251) – velice pečlivě se kontroluje.

8 Experimentální analýza tloušťky plechu

Cílem experimentální části práce bylo posoudit nehomogenitu tloušťky typových nízkožrátkových elektrotechnických plechů různých jmenovitých tlouštěk a jakosti. Celkem byly zajištěny 3 sady elektrotechnických plechů od předního světového výrobce české produkce ArcelorMittal Frýdek-Mýstek. Každá sada obsahovala 10 plechů. Měření tloušťky bylo provedeno na digitálním mikrometru o přesnosti měření 0,001 mm. Výsledné hodnoty byly zapisovány ručně do tabulek. Tato metoda měření je jen orientační, protože nejsou měřeny všechny body plechu. Nevýhoda je také v pracnosti prováděného měření.

Mezní úchytky tloušťky měřené v libovolném místě v rámci jedné zkušební jednotky nesmí být větší než $\pm 0,030$ mm od jmenovité tloušťky, kromě plechů se jmenovitou tloušťkou 0,23 mm, u kterých tato mezní úchytky nesmí překročit $\pm 0,025$ mm. Zvýšení tloušťky plechů a pásů vlivem svarů nesmí překročit 0,050 mm. [21]



Obr. 30 - Měřený vzorek s vyznačenými body měření

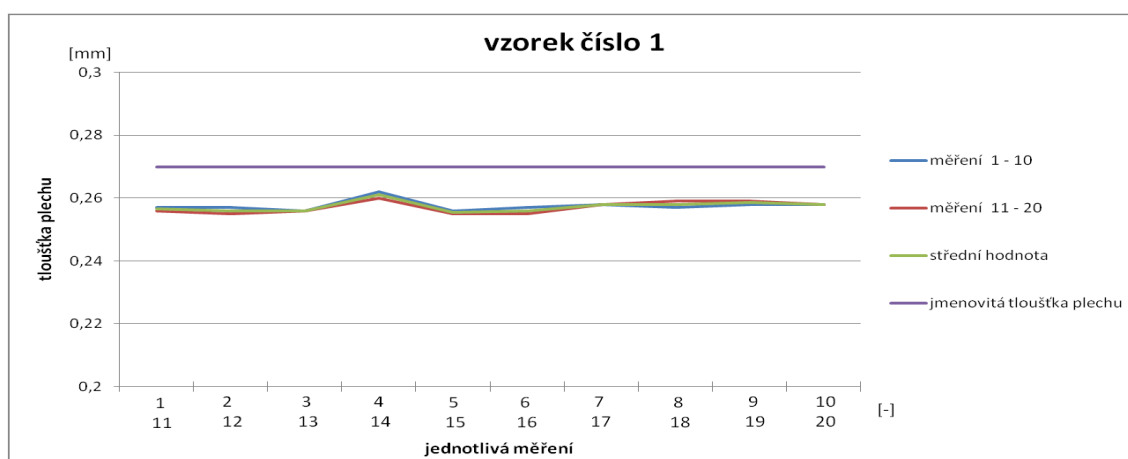


Obr. 31 - Sady plechů pro experimentální analýzu tloušťky

8.1 Sada plechů 1

Tab. 15 - Naměřené hodnoty vzorku 1

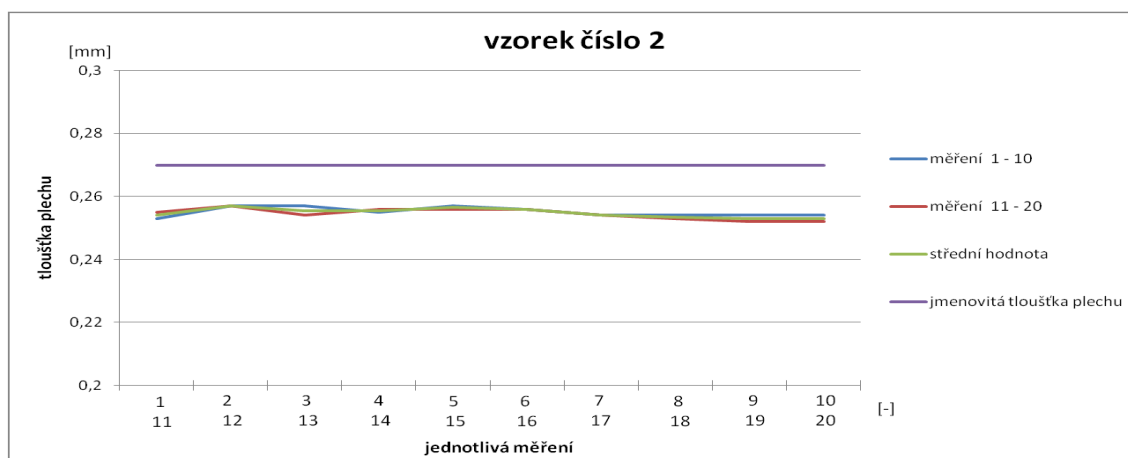
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,257	0,257	0,256	0,262	0,256	0,257	0,258	0,257	0,258	0,258	0,258
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,256	0,255	0,256	0,260	0,255	0,255	0,258	0,259	0,259	0,258	0,257
Střední hodnota	0,257	0,256	0,256	0,261	0,256	0,256	0,258	0,258	0,257	0,258	0,258



Obr. 32 - Vzorek číslo 1

Tab. 16 - Naměřené hodnoty vzorku 2

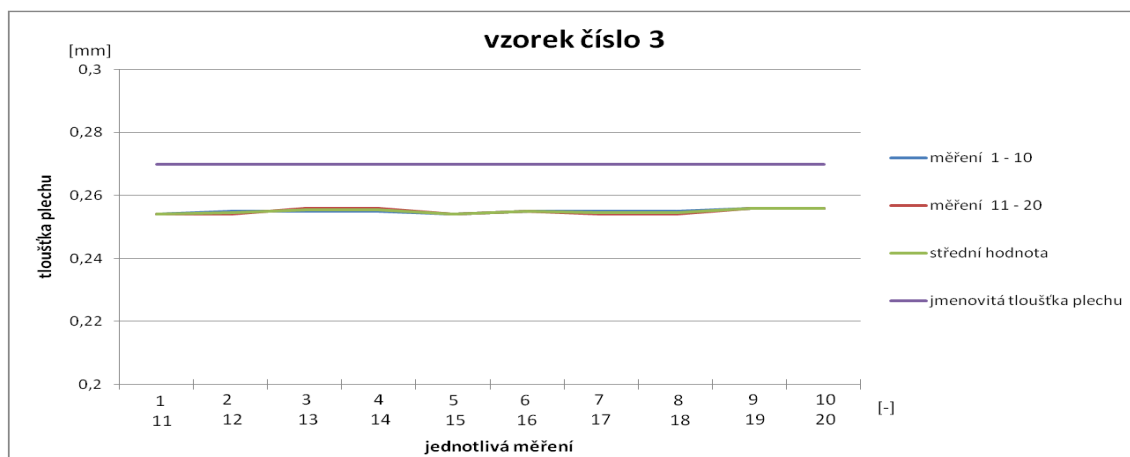
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,253	0,257	0,257	0,255	0,257	0,256	0,254	0,254	0,254	0,254	0,255
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,255	0,257	0,254	0,256	0,256	0,256	0,254	0,253	0,252	0,252	0,255
Střední hodnota	0,254	0,257	0,256	0,256	0,257	0,256	0,254	0,254	0,253	0,253	0,255



Obr. 33 - Vzorek číslo 2

Tab. 17 - Naměřené hodnoty vzorku 3

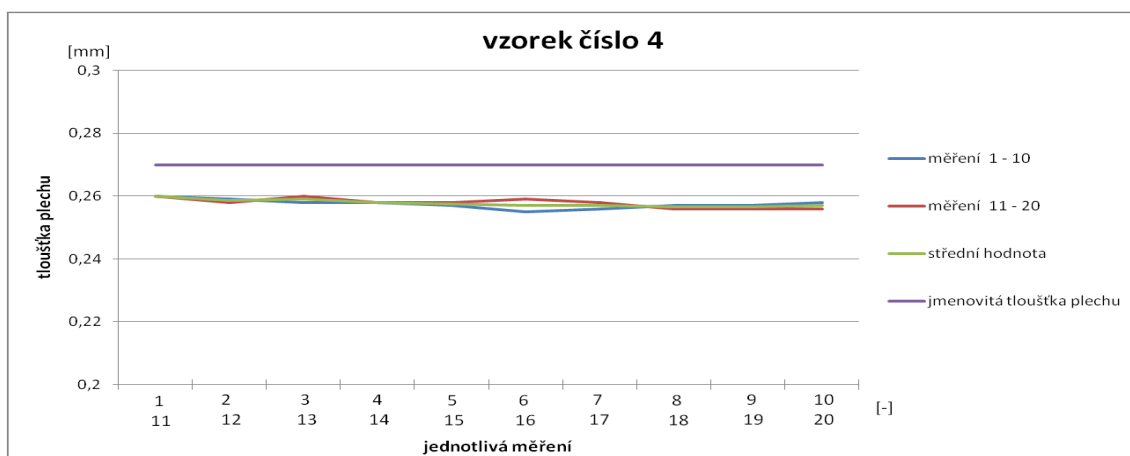
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,255	0,255	0,255	0,254	0,255	0,255	0,255	0,256	0,256	0,255
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,254	0,256	0,256	0,254	0,255	0,254	0,254	0,256	0,256	0,255
Střední hodnota	0,254	0,256	0,256	0,256	0,254	0,255	0,255	0,255	0,256	0,256	0,255



Obr. 34 - Vzorek číslo 3

Tab. 18 - Naměřené hodnoty vzorku 4

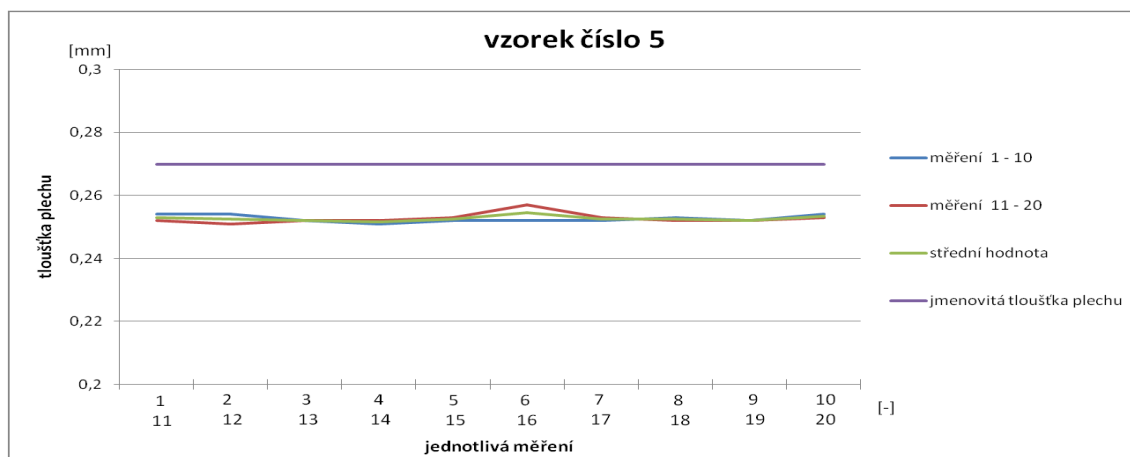
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,260	0,259	0,258	0,258	0,257	0,255	0,256	0,257	0,257	0,258	0,258
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,260	0,258	0,260	0,258	0,258	0,259	0,258	0,256	0,256	0,256	0,258
Střední hodnota	0,260	0,259	0,259	0,258	0,258	0,257	0,257	0,257	0,257	0,257	0,258



Obr. 35 - Vzorek číslo 4

Tab. 19 - Naměřené hodnoty vzorku 5

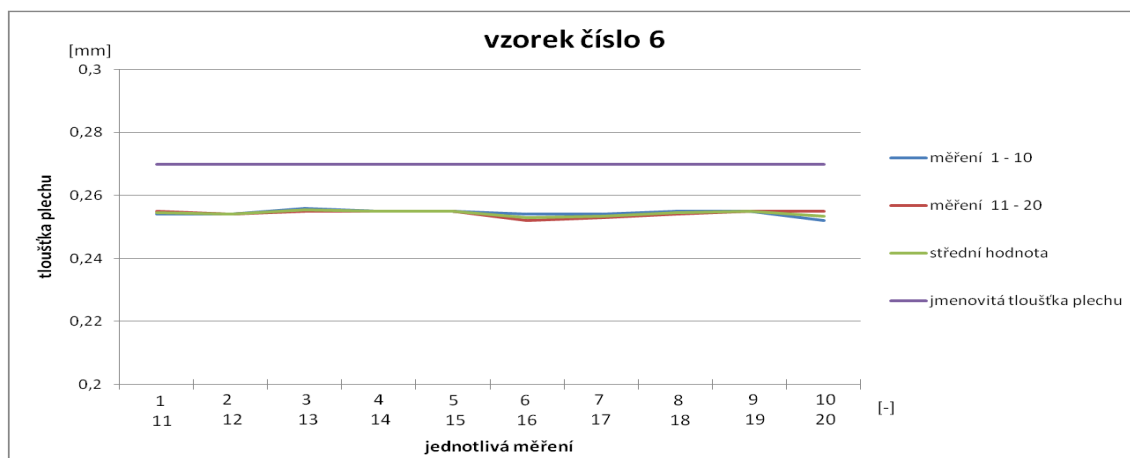
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,254	0,252	0,251	0,252	0,252	0,252	0,253	0,252	0,254	0,253
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,252	0,251	0,252	0,252	0,253	0,257	0,253	0,252	0,252	0,253	0,253
Střední hodnota	0,253	0,253	0,252	0,252	0,253	0,255	0,253	0,253	0,252	0,254	0,253



Obr. 36 - Vzorek číslo 5

Tab. 20 - Naměřené hodnoty vzorku 6

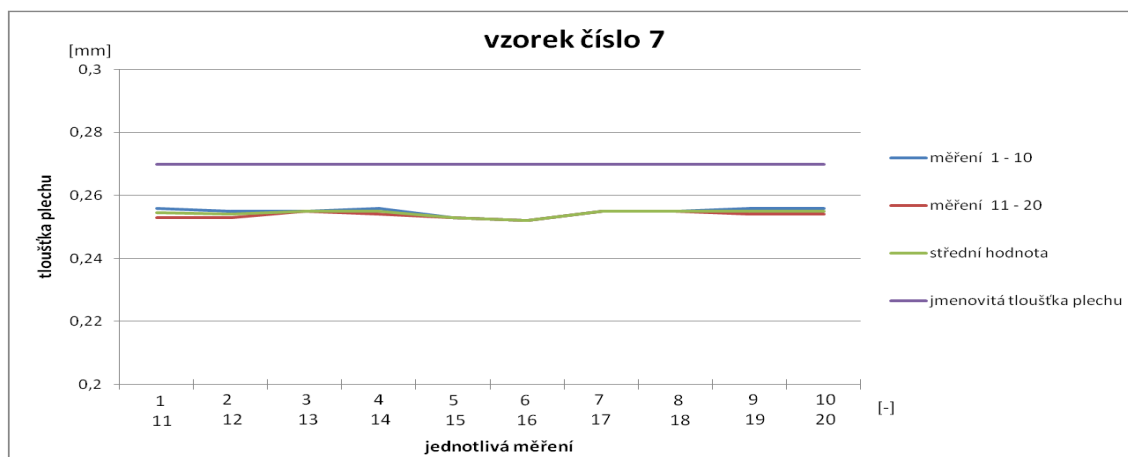
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,254	0,256	0,255	0,255	0,254	0,254	0,255	0,255	0,252	0,254
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,255	0,254	0,255	0,255	0,255	0,252	0,253	0,254	0,255	0,255	0,254
Střední hodnota	0,255	0,254	0,256	0,255	0,255	0,253	0,254	0,255	0,255	0,254	0,255



Obr. 37 - Vzorek číslo 6

Tab. 21 - Naměřené hodnoty vzorku 7

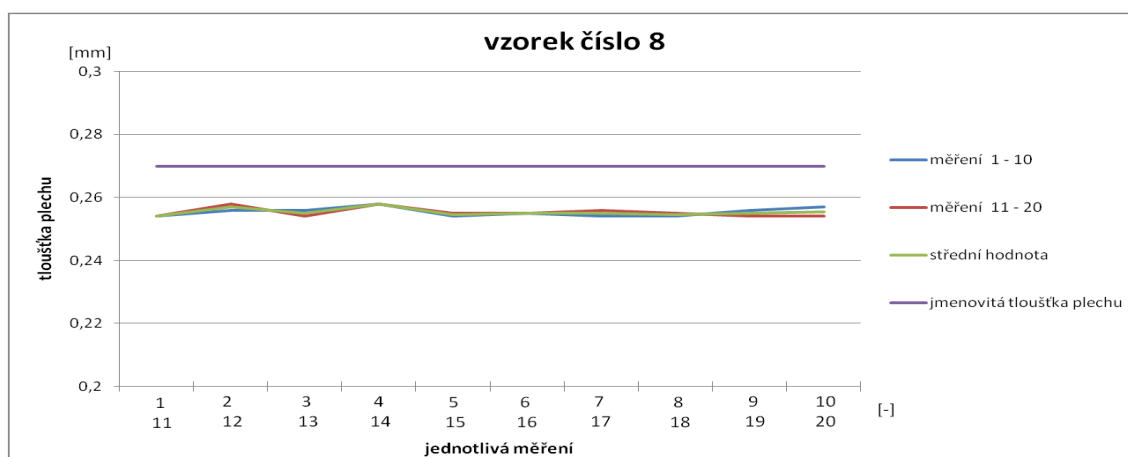
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,256	0,255	0,255	0,256	0,253	0,252	0,255	0,255	0,256	0,256	0,255
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,253	0,253	0,255	0,254	0,253	0,252	0,255	0,255	0,254	0,254	0,254
Střední hodnota	0,255	0,254	0,255	0,255	0,253	0,252	0,255	0,255	0,255	0,255	0,254



Obr. 38 - Vzorek číslo 7

Tab. 22 - Naměřené hodnoty vzorku 8

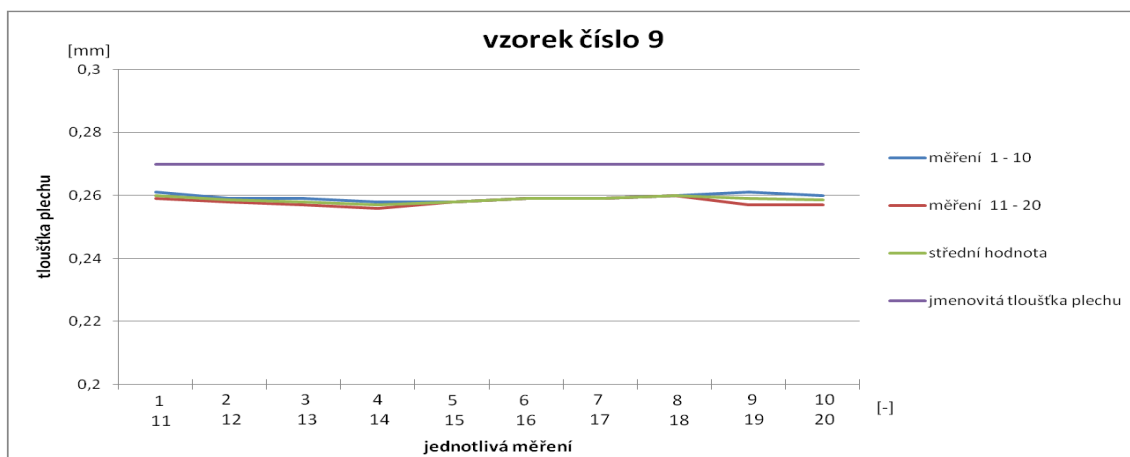
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,256	0,256	0,258	0,254	0,255	0,254	0,254	0,256	0,257	0,255
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,254	0,258	0,254	0,258	0,255	0,255	0,256	0,255	0,254	0,254	0,255
Střední hodnota	0,254	0,257	0,255	0,258	0,255	0,255	0,255	0,255	0,255	0,256	0,256



Obr. 39 - Vzorek číslo 8

Tab. 23 - Naměřené hodnoty vzorku 9

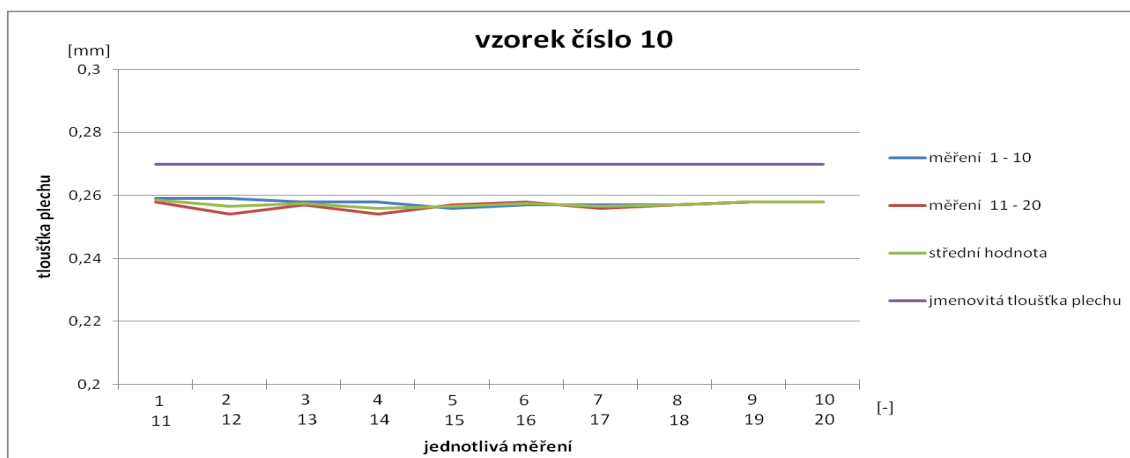
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,261	0,259	0,259	0,258	0,258	0,259	0,259	0,260	0,261	0,260	0,259
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,259	0,258	0,257	0,256	0,258	0,259	0,259	0,260	0,257	0,257	0,258
Střední hodnota	0,260	0,259	0,258	0,257	0,258	0,259	0,259	0,260	0,259	0,259	0,259



Obr. 40 - Vzorek číslo 9

Tab. 24 - Naměřené hodnoty vzorku 10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,259	0,259	0,258	0,258	0,256	0,257	0,257	0,257	0,258	0,258	0,258
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,258	0,254	0,257	0,254	0,257	0,258	0,256	0,257	0,258	0,258	0,257
Střední hodnota	0,259	0,257	0,258	0,256	0,257	0,258	0,257	0,257	0,258	0,258	0,258

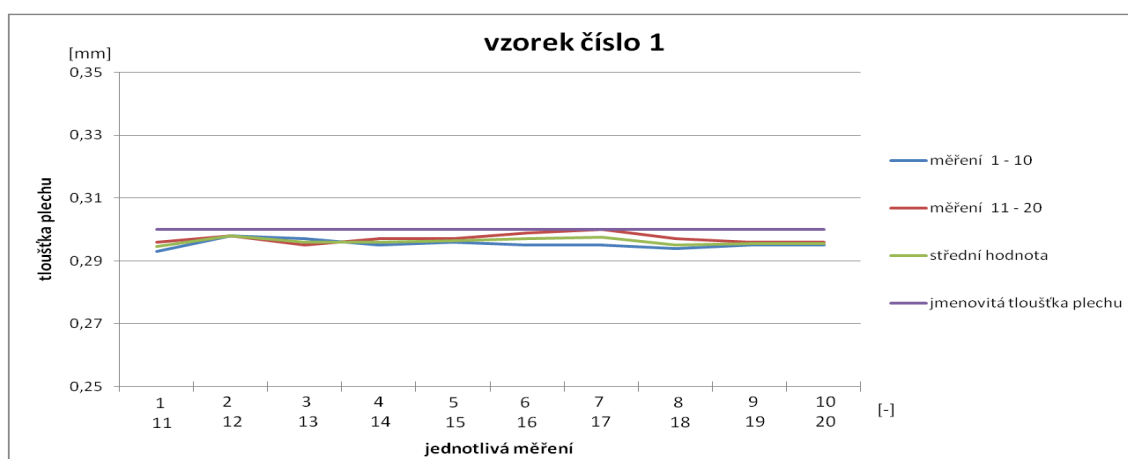


Obr. 41 - Vzorek číslo 10

8.2 Sada plechů 2

Tab. 25 - Naměřené hodnoty vzorku 1

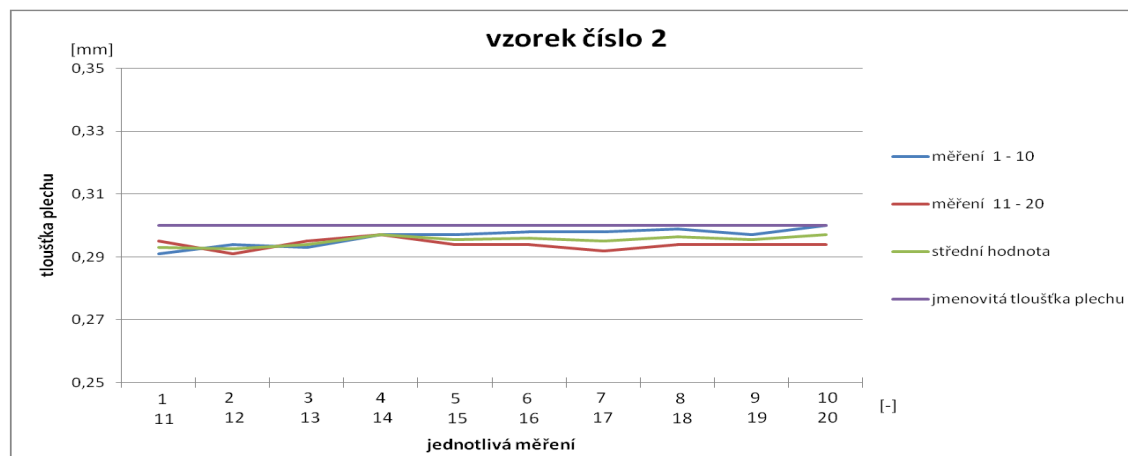
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,293	0,298	0,297	0,295	0,296	0,295	0,295	0,294	0,295	0,295	0,295
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,298	0,295	0,297	0,297	0,299	0,300	0,297	0,296	0,296	0,297
Střední hodnota	0,295	0,298	0,296	0,296	0,297	0,297	0,298	0,295	0,296	0,296	0,296



Obr. 42 - Vzorek číslo 1

Tab. 26 - Naměřené hodnoty vzorku 2

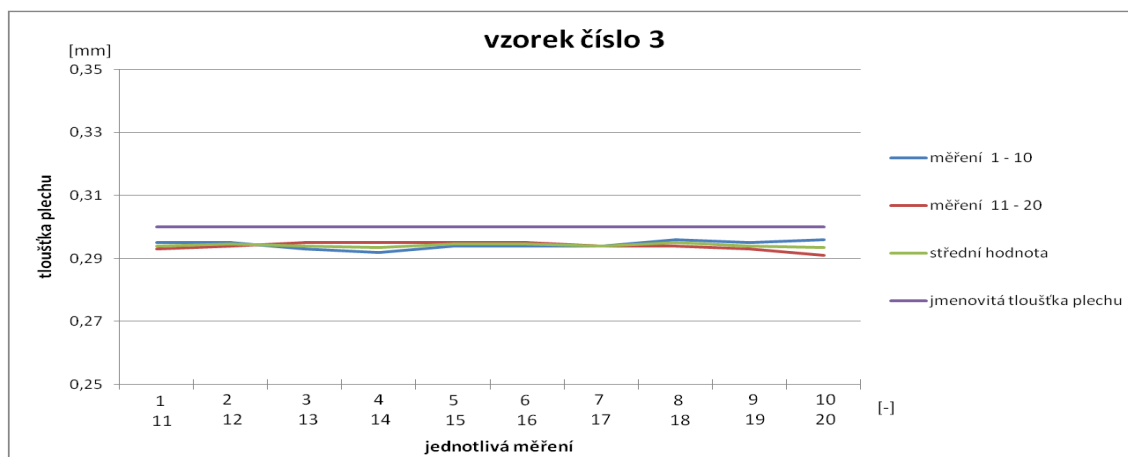
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,291	0,294	0,293	0,297	0,297	0,298	0,298	0,299	0,297	0,300	0,296
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,295	0,291	0,295	0,297	0,294	0,294	0,292	0,294	0,294	0,294	0,294
Střední hodnota	0,293	0,293	0,294	0,297	0,296	0,296	0,295	0,297	0,296	0,297	0,295



Obr. 43 - Vzorek číslo 2

Tab. 27 - Naměřené hodnoty vzorku 3

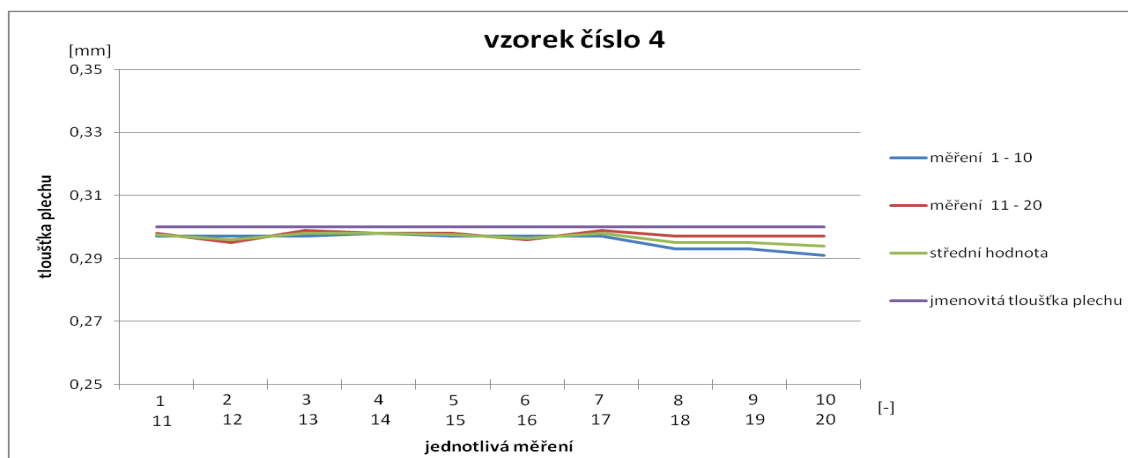
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,295	0,295	0,293	0,292	0,294	0,294	0,294	0,296	0,295	0,296	0,294
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,293	0,294	0,295	0,295	0,295	0,295	0,294	0,294	0,293	0,291	0,294
Střední hodnota	0,294	0,295	0,294	0,294	0,295	0,295	0,294	0,295	0,294	0,294	0,294



Obr. 44 - Vzorek číslo 3

Tab. 28 - Naměřené hodnoty vzorku 4

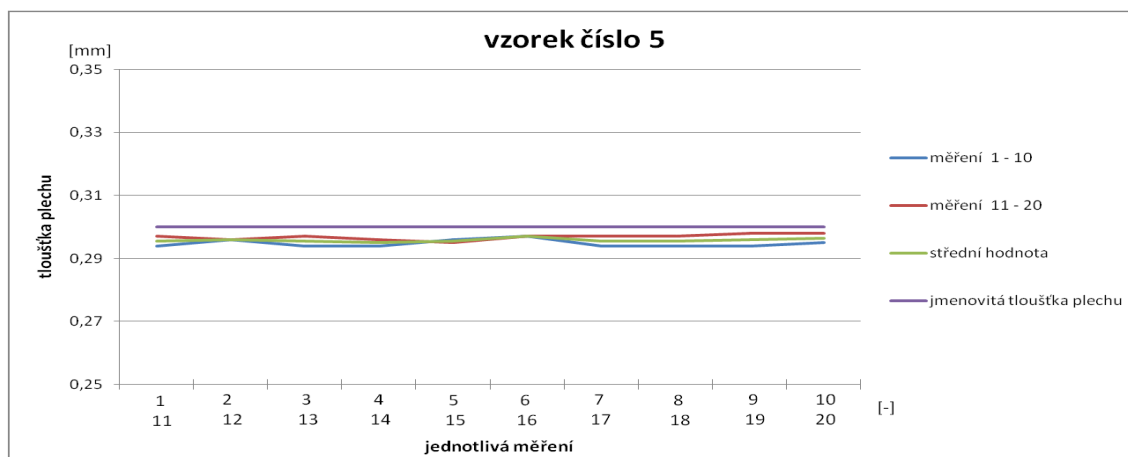
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,297	0,297	0,297	0,298	0,297	0,297	0,297	0,293	0,293	0,291	0,296
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,298	0,295	0,299	0,298	0,298	0,296	0,299	0,297	0,297	0,297	0,297
Střední hodnota	0,298	0,296	0,298	0,298	0,298	0,297	0,298	0,295	0,295	0,294	0,297



Obr. 45 - Vzorek číslo 4

Tab. 29 - Naměřené hodnoty vzorku 5

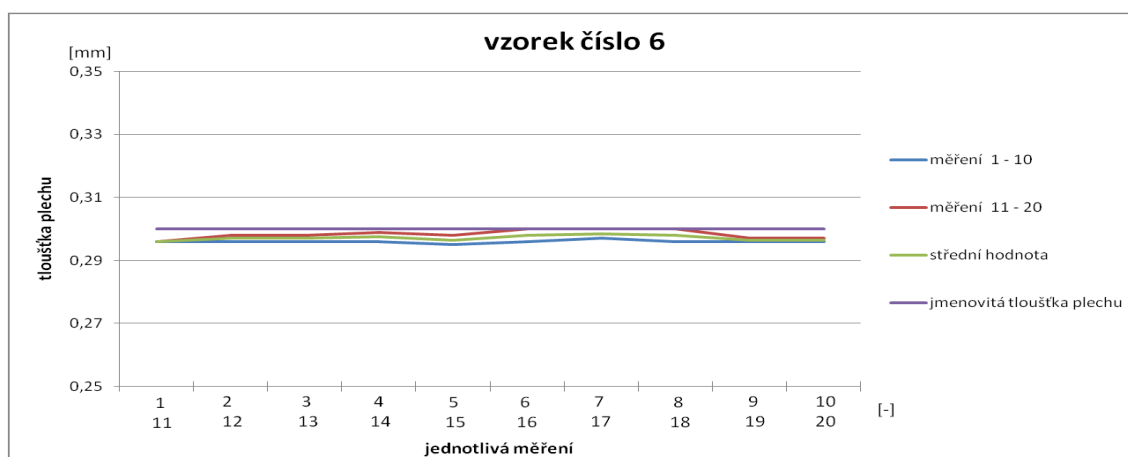
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,294	0,296	0,294	0,294	0,296	0,297	0,294	0,294	0,294	0,295	0,295
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,297	0,296	0,297	0,296	0,295	0,297	0,297	0,297	0,298	0,298	0,297
Střední hodnota	0,296	0,296	0,296	0,295	0,296	0,297	0,296	0,296	0,296	0,297	0,296



Obr. 46 - Vzorek číslo 5

Tab. 30 - Naměřené hodnoty vzorku 6

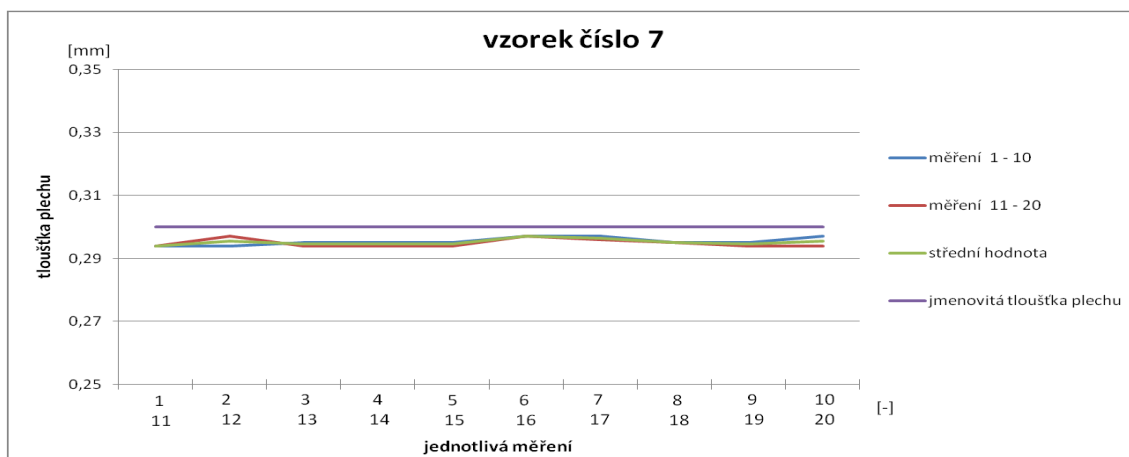
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,296	0,296	0,296	0,295	0,296	0,297	0,296	0,296	0,296	0,296
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,298	0,298	0,299	0,298	0,300	0,300	0,300	0,297	0,297	0,298
Střední hodnota	0,296	0,297	0,297	0,298	0,297	0,298	0,299	0,298	0,297	0,297	0,297



Obr. 47 - Vzorek číslo 6

Tab. 31 - Naměřené hodnoty vzorku 7

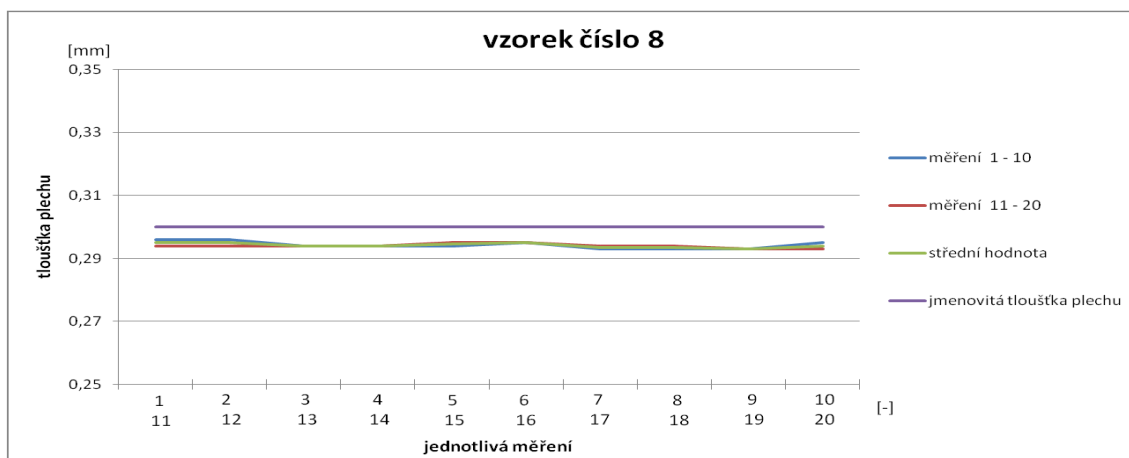
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,294	0,294	0,295	0,295	0,295	0,297	0,297	0,295	0,295	0,297	0,295
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,294	0,297	0,294	0,294	0,294	0,297	0,296	0,295	0,294	0,294	0,295
Střední hodnota	0,294	0,296	0,295	0,295	0,295	0,297	0,297	0,295	0,295	0,296	0,295



Obr. 48 - Vzorek číslo 7

Tab. 32 - Naměřené hodnoty vzorku 8

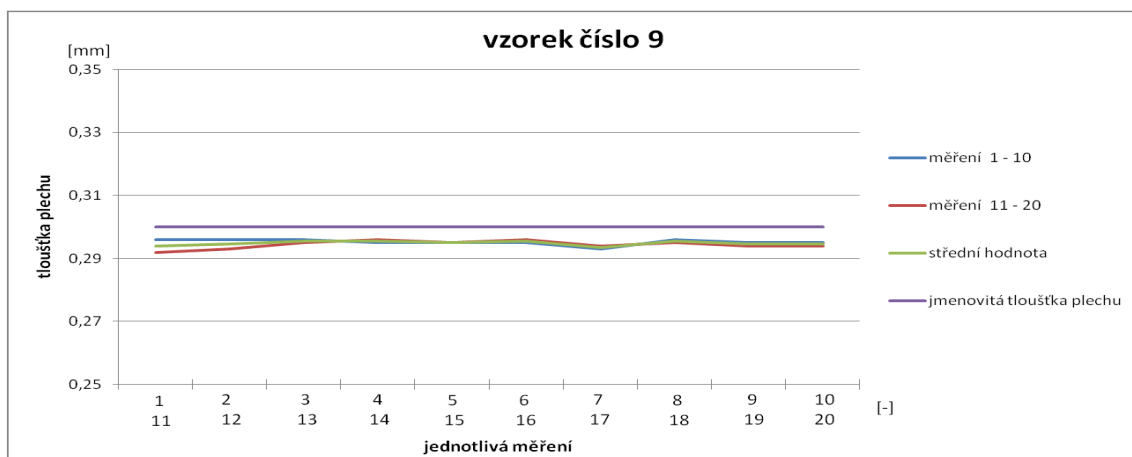
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,296	0,294	0,294	0,294	0,295	0,293	0,293	0,293	0,295	0,294
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,294	0,294	0,294	0,294	0,295	0,295	0,294	0,294	0,293	0,293	0,294
Střední hodnota	0,295	0,295	0,294	0,294	0,295	0,295	0,294	0,294	0,293	0,294	0,294



Obr. 49 - Vzorek číslo 8

Tab. 33 - Naměřené hodnoty vzorku 9

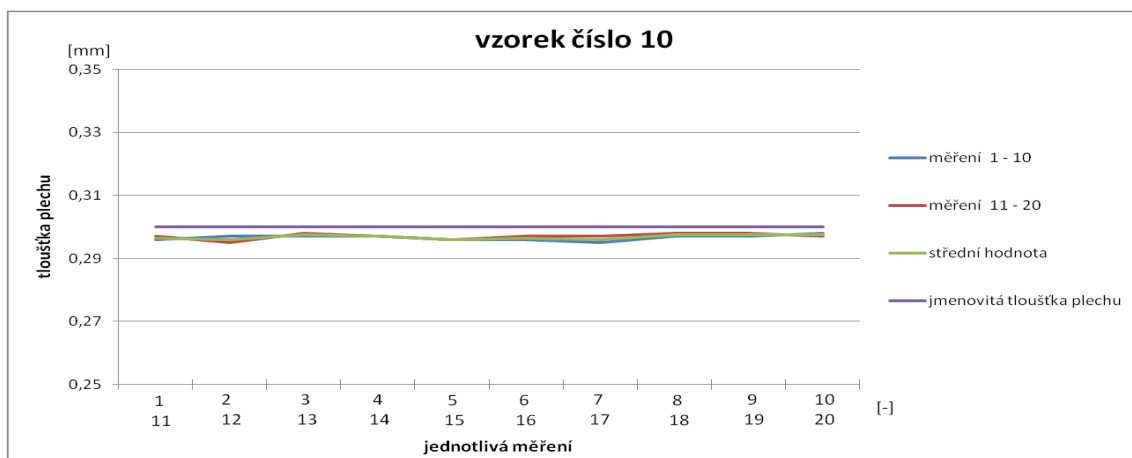
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,296	0,296	0,295	0,295	0,295	0,293	0,296	0,295	0,295	0,295
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,292	0,293	0,295	0,296	0,295	0,296	0,294	0,295	0,294	0,294	0,294
Střední hodnota	0,294	0,295	0,296	0,296	0,295	0,296	0,294	0,296	0,295	0,295	0,295



Obr. 50 - Vzorek číslo 9

Tab. 34 - Naměřené hodnoty vzorku 10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,296	0,297	0,297	0,297	0,296	0,296	0,295	0,297	0,297	0,298	0,297
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,297	0,295	0,298	0,297	0,296	0,297	0,297	0,298	0,298	0,297	0,297
Střední hodnota	0,297	0,296	0,298	0,297	0,296	0,297	0,296	0,298	0,298	0,298	0,297

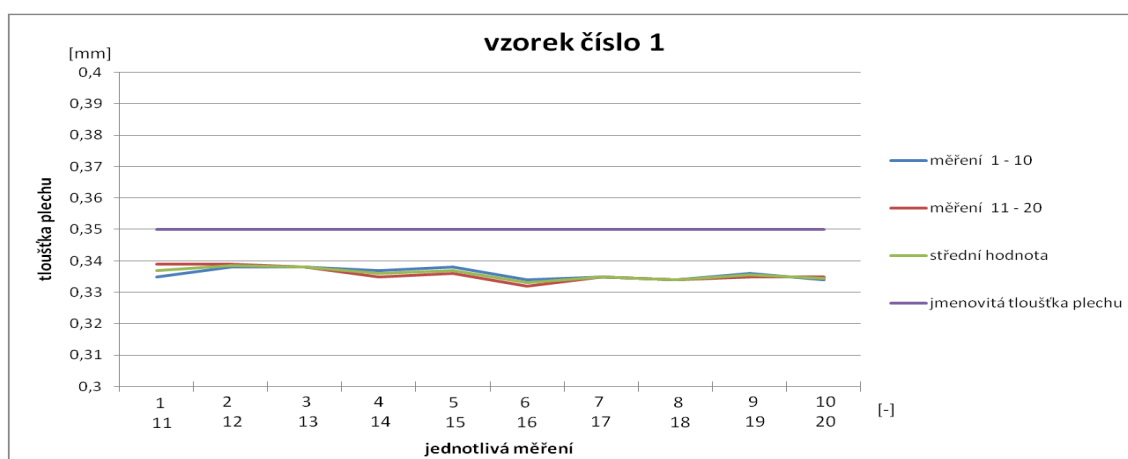


Obr. 51 - Vzorek číslo 10

8.3 Sada plechů 3

Tab. 35 - Naměřené hodnoty vzorku 1

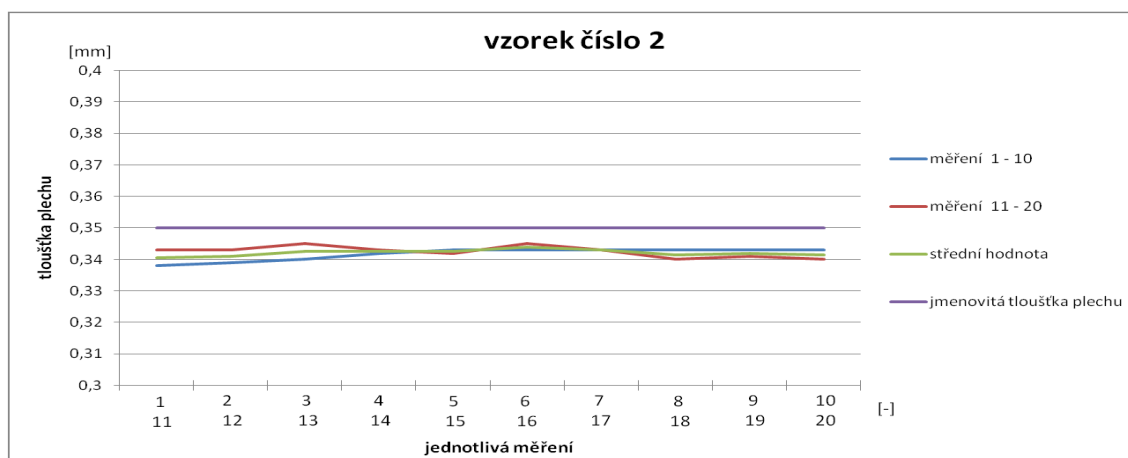
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,335	0,338	0,338	0,337	0,338	0,334	0,335	0,334	0,336	0,334	0,336
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,339	0,339	0,338	0,335	0,336	0,332	0,335	0,334	0,335	0,335	0,336
Střední hodnota	0,337	0,339	0,338	0,336	0,337	0,333	0,335	0,334	0,336	0,335	0,336



Obr. 52 - Vzorek číslo 1

Tab. 36 - Naměřené hodnoty vzorku 2

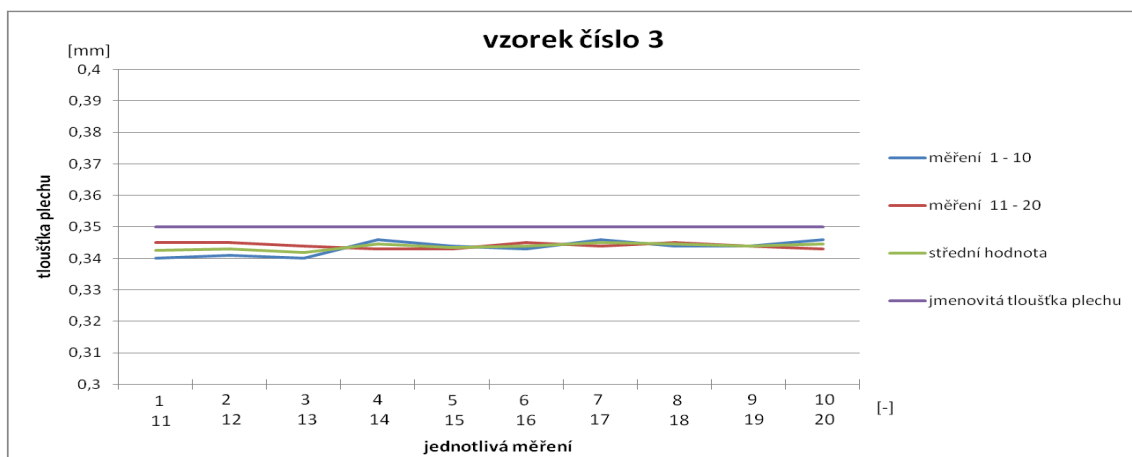
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,338	0,339	0,340	0,342	0,343	0,343	0,343	0,343	0,343	0,343	0,342
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,343	0,343	0,345	0,343	0,342	0,345	0,343	0,340	0,341	0,340	0,343
Střední hodnota	0,341	0,341	0,343	0,343	0,343	0,344	0,343	0,342	0,342	0,342	0,342



Obr. 53 - Vzorek číslo 2

Tab. 37 - Naměřené hodnoty vzorku 3

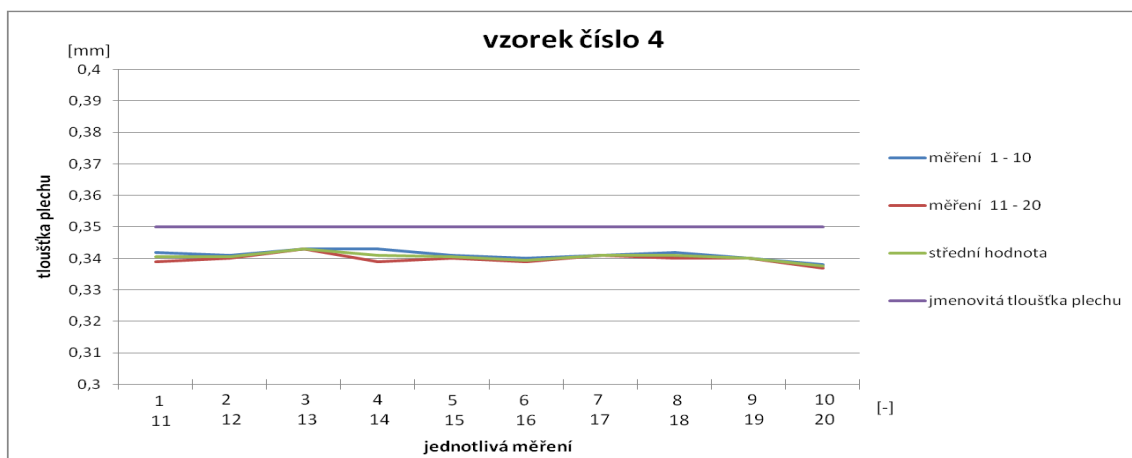
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,340	0,341	0,340	0,346	0,344	0,343	0,346	0,344	0,344	0,346	0,343
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,345	0,345	0,344	0,343	0,343	0,345	0,344	0,345	0,344	0,343	0,344
Střední hodnota	0,343	0,343	0,342	0,345	0,344	0,344	0,345	0,345	0,344	0,345	0,344



Obr. 54 - Vzorek číslo 3

Tab. 38 - Naměřené hodnoty vzorku 4

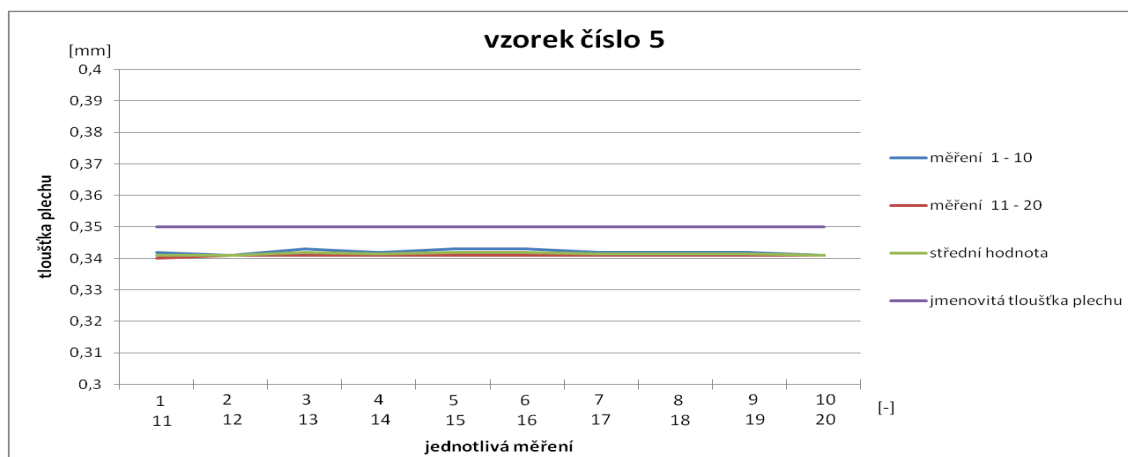
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,342	0,341	0,343	0,343	0,341	0,340	0,341	0,342	0,340	0,338	0,341
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,339	0,340	0,343	0,339	0,340	0,339	0,341	0,340	0,340	0,337	0,340
Střední hodnota	0,341	0,341	0,343	0,341	0,341	0,340	0,341	0,341	0,340	0,338	0,341



Obr. 55 - Vzorek číslo 4

Tab. 39 - Naměřené hodnoty vzorku 5

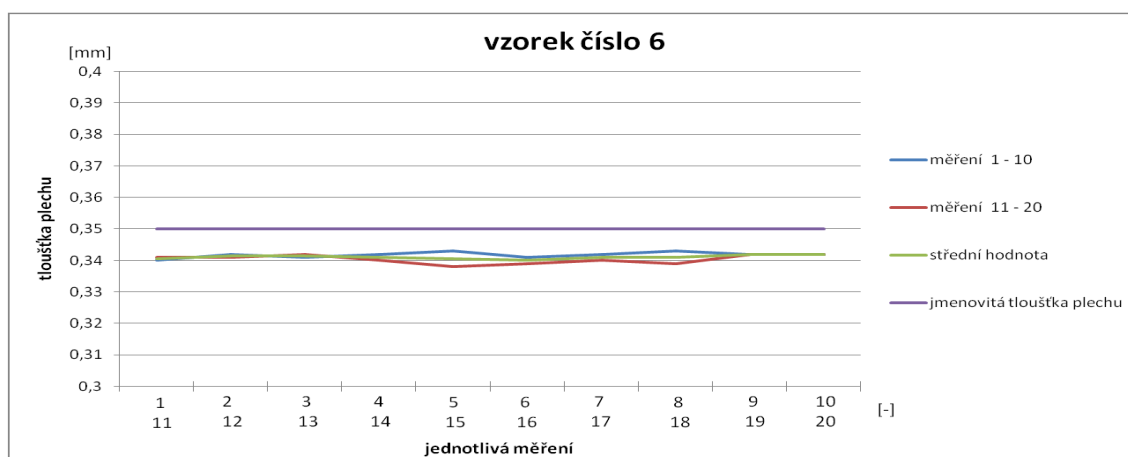
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,342	0,341	0,343	0,342	0,343	0,343	0,342	0,342	0,342	0,341	0,342
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,340	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341	0,341
Střední hodnota	0,341	0,341	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,341	0,342



Obr. 56 - Vzorek číslo 5

Tab. 40 - Naměřené hodnoty vzorku 6

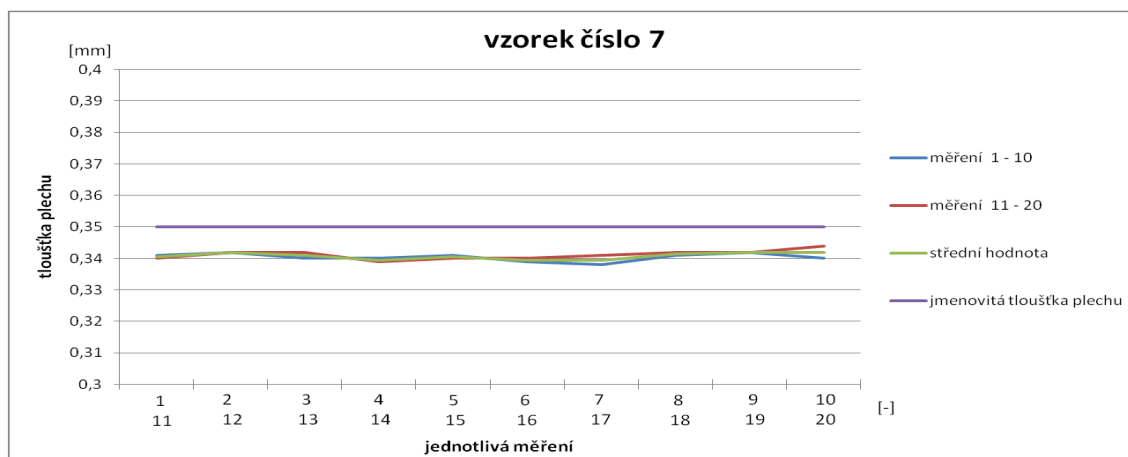
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,340	0,342	0,341	0,342	0,343	0,341	0,342	0,343	0,342	0,342	0,342
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,341	0,341	0,342	0,340	0,338	0,339	0,340	0,339	0,342	0,342	0,340
Střední hodnota	0,341	0,342	0,342	0,341	0,341	0,340	0,341	0,341	0,342	0,342	0,341



Obr. 57 - Vzorek číslo 6

Tab. 41 - Naměřené hodnoty vzorku 7

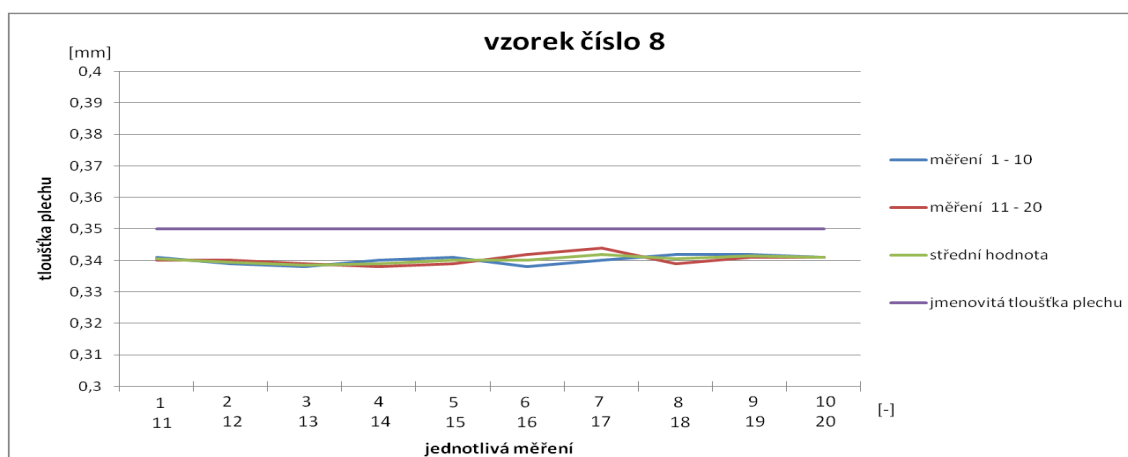
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,341	0,342	0,340	0,340	0,341	0,339	0,338	0,341	0,342	0,340	0,340
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,340	0,342	0,342	0,339	0,340	0,340	0,341	0,342	0,342	0,344	0,341
Střední hodnota	0,341	0,342	0,341	0,340	0,341	0,340	0,340	0,342	0,342	0,342	0,341



Obr. 58 - Vzorek číslo 7

Tab. 42 - Naměřené hodnoty vzorku 8

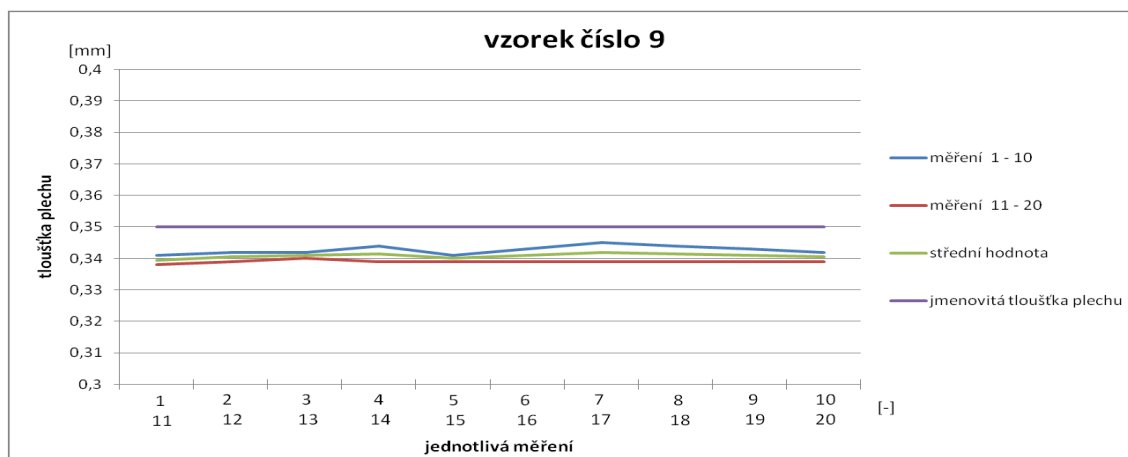
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,341	0,339	0,338	0,340	0,341	0,338	0,340	0,342	0,342	0,341	0,340
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,340	0,340	0,339	0,338	0,339	0,342	0,344	0,339	0,341	0,341	0,340
Střední hodnota	0,341	0,340	0,339	0,339	0,340	0,340	0,342	0,341	0,342	0,341	0,341



Obr. 59 - Vzorek číslo 8

Tab. 43 - Naměřené hodnoty vzorku 9

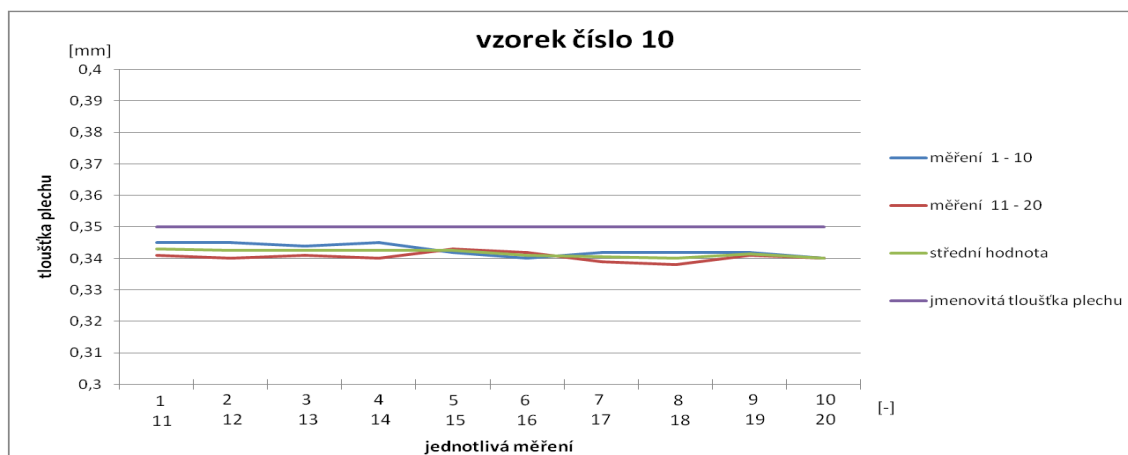
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,341	0,342	0,342	0,344	0,341	0,343	0,345	0,344	0,343	0,342	0,343
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,338	0,339	0,340	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339	0,339
Střední hodnota	0,340	0,341	0,341	0,342	0,340	0,341	0,342	0,342	0,341	0,341	0,341



Obr. 60 - Vzorek číslo 9

Tab. 44 - Naměřené hodnoty vzorku 10

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,345	0,345	0,344	0,345	0,342	0,340	0,342	0,342	0,342	0,340	0,343
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Průměrná střední hodnota tloušťky vzorku
	0,341	0,340	0,341	0,340	0,343	0,342	0,339	0,338	0,341	0,340	0,341
Střední hodnota	0,343	0,343	0,343	0,343	0,343	0,341	0,341	0,340	0,342	0,340	0,342



Obr. 61 - Vzorek číslo 10

8.4 Celková průměrná střední hodnota tloušťky sady 1; 2; 3

Tab. 45 - Celková průměrná střední hodnota tloušťky plechů sady 1

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky sady
Průměrná střední hodnota	0,258	0,255	0,255	0,258	0,253	0,254	0,254	0,256	0,259	0,258	0,256

Tab. 46 - Celková průměrná střední hodnota tloušťky plechů sady 2

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky sady
Průměrná střední hodnota	0,296	0,295	0,294	0,297	0,269	0,297	0,295	0,294	0,295	0,297	0,296

Tab. 47 - Celková průměrná střední hodnota tloušťky plechů sady 3

Číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměrná střední hodnota tloušťky sady
Průměrná střední hodnota	0,336	0,342	0,344	0,341	0,342	0,341	0,341	0,341	0,341	0,342	0,341

9 Zhodnocení a závěr

V této diplomové práci jsem se zaměřil na výrobu a diagnostiku jakosti nízkoztrátových plechů pro stavbu magnetických jader transformátorů. Měl jsem možnost navštívit válcovny plechů ArcelorMittal ve Frýdku-Místku a seznámit se zde s výrobou a způsobem měření v jejich závodě. Exkurze mě obohatila o cenné informace a byla přínosem při psaní této práce.

Tolerance tvarů a rozměrů plechů pro elektrotechniku se řídí normami. Z uvedených grafů je zřejmé, že všechny naměřené hodnoty splňují mezní úchytky tloušťky podle normy ČSN EN 10107. Žádný z měřených vzorků nepřesahuje jmenovitou tloušťku.

Měření bylo provedeno na třech sadách plechů pro elektrotechniku o jmenovitých hodnotách 0,27 mm (sada 1), 0,30 mm (sada 2), 0,35 mm (sada 3). U každé z nich se průměrná střední hodnota tloušťky celé sady lišila od jmenovité tloušťky plechu. Největší rozdíl od jmenovité hodnoty tloušťky měla sada 1, která byla tenčí o 5,2 % než její jmenovitá hodnota. Sada 2 se lišila od jmenovité tloušťky plechu 0,30 mm nejméně, průměrná střední tloušťka plechů této sady byla o 1,3 % menší. O 2,6 % byla menší průměrná střední tloušťka plechů v sadě 3.

Z měření a grafů ale také vyplývá, že všechny plechy mají nehomogenní povrch. Největší nehomogenita byla naměřena u sady 2 ve vzorku dvě, číslo měření 7 – 17 (tab. 26) a u vzorku čtyři, měření 10 – 20 (tab. 28), která činila 0,006 mm.

Při výrobě ovlivňuje tyto nerovnosti mnoho faktorů, jako například opotřebení vále, mikroskopické nečistoty a jiné. Žádný z vyrobených elektrotechnických plechů nedosahuje ideálních geometrických tvarů. To znamená, že nedosáhne ideální rovinnosti a přímosti v podélném a příčném řezu tvaru obdélníka. Každý výrobce se pochopitelně snaží ideálním tvarům co nejvíce přiblížit, zároveň však zajistit rentabilitu při dané náročnosti výroby. Nicméně skutečnost, že rozdíly od jmenovitých tlouštěk byly takto nevýrazné, vypovídá kladně o stabilitě výrobního procesu těchto plechů.

10 Použité zdroje

- [1] DRAXLER, K., KAŠPAR, P., RIPKA, P.: *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1999. 276 s. ISBN 80-010-1909-8.
- [2] MAREK, M.: *Způsoby zjišťování magnetických vlastností konstrukčních materiálů, specifické příklady užití a aplikací magnetických měření*, disertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2005. 108 s.
- [3] BROŽ, J.: *Moderní problémy feromagnetismu*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962. 192 s.
- [4] BENEŠ, A., DRASTÍK, F., HOSTINSKÝ, Z., KOUTSKÝ, J., NĚMEC, J.: *Nauka o kovech*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha: 1972. 355 s.
- [5] MACHEK, V., SODOMKA, J.: *Speciální kovové materiály*, České vysoké učení technické, Praha: 2008. 118 s.
- [6] REINBOTH, H.: *Vlastnosti a použití magnetických materiálů*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha. 1975. 510 s.
- [7] HASSDENTEUFEL, J., KVĚT, K. a kolektiv: *Elektrotechnické materiály*, SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha. 1967. 857 s.
- [8] FAKTOR, Z.: *Transformátory a cívky*, BEN – technická literatura, Praha. 1999, 393 s.
- [9] PAVLÍKOVÁ, R.: *Vliv mezitloušťky GOES pásu na rekrytalizační procesy a magnetické vlastnosti*, diplomová práce, VŠB – TU Ostrava, 2011, 64 s.
- [10] *Ocelové pásy 2006: 7. mezinárodní konference: sborník přednášek: 4. – 6. října 2006, Přerov = Steel strip 2006: The 7th international conference: conference proceedings : 4. – 6. October 2006, Přerov*. Editor P. Bačák. Ostrava: Společnost Ocelové pásy, c2006, 372 s. ISBN 80-239-7750-4
- [11] *Supermagnety.cz*. [online]. 12. 3. 2012 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.supermagnety.cz>>
- [12] *ABC Magnet*. [online]. 25. 1. 2012 [cit. 2012-01-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.abcmagnet.cz>>
- [13] *Magnetické látky* [online]. 26. 12. 2011 [cit. 2011-12-26]. Dostupné z WWW: <http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=444>

- [14] *Hysterezní smyčka* [online]. 11. 11. 2011 [cit. 2011-11-11]. Dostupné z WWW: <<http://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-01.3825234139>>
- [15] *Stránky katedry elektroenergetiky* [online]. 2011 Dostupné z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f_studium.htm>
- [16] *Posouzení magnetické anizotropie orientovaného křemíkového plechu* [online]. 10. 2. 2012 [cit. 2012-02-10]. Dostupné z WWW: <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_3.pdf>
- [17] *Brockhaus measurements* [online]. 14. 3. 2012 [cit. 2012-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.brockhaus.com/en/measurements>>
- [18] *Posuvné měřítko* [online]. 27. 3. 2012 [cit. 2012-03-27]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Posuvn%C3%A9_m%C4%9B%C5%99%C3%ADtko>
- [19] *Úvod do absolutních snímačů* [online]. 11. 4. 2012 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.mitutoyo-czech.cz/pdf/katalog/cz/PRC1284%20-%20Uvod%20do%20absolutnich%20snimacu.pdf>>
- [20] *Automatická detekce povrchových vad* [online]. 14. 2. 2012 [cit. 2012-02-14] Dostupné z WWW: <<http://www.uvbtechnik.cz/automaticka-detekce-povrchovych-vad>>
- [21] ČSN EN 10107. *Plechý a pásy pro elektrotechniku anizotropní dodávané v tepelně zpracovaném stavu*. Český normalizační institut, 2006.